



Utilisation des données de MAREL Carnot pour la compréhension des mécanismes des extrêmes dans la qualité des eaux à Boulogne-sur-Mer

Jonathan Derot

► To cite this version:

Jonathan Derot. Utilisation des données de MAREL Carnot pour la compréhension des mécanismes des extrêmes dans la qualité des eaux à Boulogne-sur-Mer. Hydrologie. Université du Littoral Côte d'Opale, 2014. Français. NNT : 2014DUNK0375 . tel-01123957v2

HAL Id: tel-01123957

<https://theses.hal.science/tel-01123957v2>

Submitted on 17 Jun 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE DU LITTORAL COTE D'OPALE

ECOLE DOCTORALE : Science de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement

Doctorat

Pour obtenir le grade de DOCTEUR de L'UNIVERSITE DU LITTORAL COTE D'OPALE

Discipline : Géosciences, Ecologie, Paléontologie, Océanographique

Par

JONATHAN DEROT

Utilisation des données de MAREL Carnot pour la compréhension des mécanismes des extrêmes dans la qualité des eaux à Boulogne-sur-Mer

Thèse dirigée par **François G. Schmitt**, directeur de recherche au CNRS
Soutenue de 12 décembre 2014

Jury :

Felipe Artigas, MC, Université du littoral Côte d'Opale

Gilles Durrieu, PR, Université de Bretagne-Sud

Valérie Gentilhomme, MC, Université de Lille 1

Ingrid Puillat, Cadre de Recherche, Ifremer Brest

Sabine Schmidt, DR, CNRS, Bordeaux

François Schmitt, DR, CNRS, Wimereux

Examineur

Rapporteur

Co-encadrant

Examineur

Rapporteur

Directeur de thèse

Invités :

Alain Lefebvre, Cadre de Recherche, Ifremer Boulogne-sur-Mer

Jean Prygiel, PR associé, Université de Lille 1

Table des Matières

REMERCIEMENTS	7
INTRODUCTION GENERALE	11
CHAPITRE 1. MATERIELS ET METHODES	15
1. INTRODUCTION.....	17
2. PRESENTATION DES RESEAUX D'ANALYSES BASSE FREQUENCE.....	19
2.1 SOMLIT.....	19
2.2 SRN et REPHY	25
3 LES RESEAUX AUTOMATISES HAUTES FREQUENCES	29
3.1 Les dispositifs MAREL.....	29
3.1.1 MAREL Carnot	29
3.1.2 MAREL Iroise	35
3.2 Seabird Roscoff	36
3.3 Station L4 (UK)	38
3.4 Programme VENUS (Canada).....	39
4 BARRAGE MARGUET.....	40
5. LES PARAMETRES ANALYSES	42
5.1 Les sels nutritifs.....	42
5.2 Les différents proxy de la biomasse et le P.A.R	44
5.3 La température et la salinité	45
6 LES OUTILS METHODOLOGIQUE	46
6.1 Rappels sur la théorie de la turbulence	46
6.2 La méthode EMD.....	50
6.3 Rappels de statistiques et probabilité	53
6.3.1 Les Fonctions de densité de probabilité.....	53
6.3.2 Energie spectrale : spectre d'énergie en espace de Fourier.....	56
6.3.3 Analyse spectrale de Hilbert et méthode EMD	57
6.4 Méthodes comparatives entre séries temporelles	59
6.4.1 Co-spectre	59
6.4.2 TDIC	60
7 LE LANGAGE DE PROGRAMMATION MATLAB.....	61
CHAPITRE 2. ANALYSES DE LA DYNAMIQUE DE LA FLUORESCENCE	63
1 INTRODUCTION.....	65

2 PRESENTATION DES DONNEES ET ANALYSES PRELIMINAIRES.....	66
2.1 <i>Présentation des données et climatologie</i>	66
2.2 <i>Extrêmes et temps de retour</i>	68
2.2.1 Extrêmes des températures	69
2.2.2 Extrêmes de la fluorescence.....	73
2.2.3 temps de retour	77
3 ANALYSES MULTI-VARIEES.....	79
3.1 <i>Analyse en composante principale (ACP)</i>	79
3.2 <i>Relation avec la fluorescence</i>	80
4 ANALYSES DES DISTRIBUTIONS DE PROBABILITE ET DE LA DYNAMIQUE VIA LA DECOMPOSITION MODALE EMPIRIQUE (EMD).....	85
4.1 <i>Analyse de la distribution de probabilité</i>	85
4.1.1 Distribution de probabilité des données MAREL Carnot.....	85
4.1.2 PDF sur d'autres systèmes automatisés.....	90
4.2 <i>Analyses basées sur la méthode EMD</i>	93
4.2.1 Décomposition et filtration	93
4.2.2 Analyses spectrales HSA.....	99
5 RELATION AVEC LA DYNAMIQUE DE LA FLUORESCENCE	101
5.1 <i>Relation α</i>	101
5.2 <i>Relation β</i>	107
5.3 <i>Relation α vs β</i>	108
5.4 <i>La stratification, explication du mécanisme ?</i>	111
5.4.1 Profils.....	111
5.4.2 Dynamique de la stratification	113
5.4.3 Relation avec la stratification	115
6 DISCUSSION	116
CHAPITRE 3. COMPARAISON DES RESEAUX DE SURVEILLANCE EN MILIEU COTIER.....	121
1 INTRODUCTION.....	123
2 RESEAUX HAUTES FREQUENCES VERSUS BASSES FREQUENCES	124
2.1 <i>Comparaison température, fluorescence, oxygène dissous</i>	125
2.2 <i>Comparaison des sels nutritifs</i>	128
2.2.1 Comparaison des données brutes.....	128
2.2.2 Influence potentielle du Barrage Marguet.....	135
3 COMPARAISON DES RESEAUX HAUTES FREQUENCES.....	139

3.1 Présentation des données	139
3.2 Etude spectrale	142
3.2.1 Co-spectre	145
3.3 Méthode TDIC	146
3.4 Comparaison spectrale des températures en différentes région du globe.	152
3.4.1 Présentation des données.....	152
3.4.2 Etude spectrale.....	153
4 CONCLUSION	155
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	159
ANNEXE 1. COMPARAISON DES METHODES SPECTRALES	169
1 INTRODUCTION.....	171
2 LA METHODE LOMB-SCARGLE ET FAST LOMB	172
3 MOUVEMENT BROWNIEN	173
3.1 Présentation des données	173
3.2 Analyses spectrales	174
4 TESTS AVEC DES REPARTITIONS CONTINUES	176
4.1 Présentation des données	176
4.2 Analyses spectrales	179
4.2.1 Tests avec zéros.....	179
4.2.2 Tests avec périodes manquantes	184
5 TESTS AVEC DES REPARTITIONS ALEATOIRES	189
5.1 Présentation des données	189
5.2 Analyses spectrales	192
5.2.1 Tests avec zéros.....	192
5.2.2 Tests avec périodes manquantes	197
6 CONCLUSION	202
ANNEXE 2. ARTICLE SOUMIS A JOURNAL OF MARINE SYSTEMS.....	205
ANNEXE 3. ARTICLE PARU DANS UN OUVRAGE	239
ANNEXE 4. PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES	247
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	253
RESUME	271
ABSTRACT	272

REMERCIEMENTS

Je tenais en premier lieu à remercier mon directeur de thèse François G. Schmitt de m'avoir confié cette problématique de recherche, ainsi que la Région Nord-Pas-de-Calais et l'agence de l'eau Artois-Picardie pour le financement de cette thèse via le CNRS.

Je voudrais ensuite remercier toutes les équipes chargées des différents programmes de surveillance du littoral pour la mise à disposition de leurs bases de données sans lesquelles ce travail aurait été impossible. Donc merci à Alain Lefebvre et aux équipes d'Ifremer pour les données MAREL (Carnot et Iroise), REPHY et SRN. Merci aussi à l'ensemble des équipes chargées des réseaux de surveillance : SOMLIT à Wimereux, VENUS au Canada¹ et Western Channel Observatory en Angleterre².

Je tenais ensuite à remercier ma co-directrice de thèse Valérie Gentilhomme et Elsa Breton pour leur aide apportée aux parties portant sur la biologie marine. Merci aussi à l'ensemble du personnel de la Station Marine de Wimereux de m'avoir accueilli dans leurs locaux, bien que mon inscription administrative était faite à l'ULCO. Et plus généralement je tenais à remercier l'ensemble du LOG.

¹ Ocean Networks Canada Data Archive, <http://www.oceannetworks.ca>, temperature data from 9 February to 31 December, Oceans Networks Canada, University of Victoria, Canada. Downloaded on 12 February 2013.

² The L4 data are produced as part of the UK NERC National Capability funded Western Channel Observatory. We especially acknowledge the work of James Fishwick in maintaining the timeseries and databuoys.

Je voulais aussi personnellement remercier : Yongxiang Yuang pour m'avoir permis de maîtriser la méthode EMD, ainsi que ses dérivés (TDIC et EMD-HSA) ; Eric Goberville qui m'a donné de précieux conseils pour mieux maîtriser Matlab ; et Pannimpullath Remanan Resnosh avec qui j'ai partagé mon bureau, ce qui m'a permis de parler anglais quotidiennement.

Un grand merci à Microsoft Word qui a corrigé une partie de mes fautes d'orthographe liées à ma dyslexie, mais plus particulièrement à Olivia ma compagne qui a passé pas mal de temps à corriger le reste des fautes présentes dans ce manuscrit.

Je ne pouvais pas aussi ne pas remercier tout mes amis et collègues qui m'ont permis de me changer les idées durant mes études supérieures et désolé par avance pour ceux que je vais oublier de citer. Donc merci à : Max l'homme à l'harmonica plus connu sous le nom de l'ours des Carpates ; Mika qui aujourd'hui ne se fait pas de sushis ; JB mi-homme mimolette ; Nemo le poisson qui fait des bulles en verres ; Remi dit le lapin et je veux pas savoir pourquoi ; Manu ou John ou Manu ah je sais plus ! ; Eden l'homme à la basse acoustique ; Robin mais kesseu-c'est ? ; Toftof qui a reçu l'illumination divine ; Erwin et Mathias mes senpai geek ; Simon ; Bertrand ; Ju ; Yoan ; ...

Un merci un peu spécial à tous ces professeurs du cycle secondaire qui pensaient détenir la panacée, alors qu'ils n'ont jamais compris les problèmes engendrés par la dyslexie. Ces derniers pensaient que je n'avais pas la capacité intellectuelle pour avoir le bac et que l'obtention d'un BEP serait déjà un exploit en soi dans mon cas. Donc merci à eux car ils m'ont finalement donné envie de leur donner tort, ce qui a souvent été une source de motivation durant mes études supérieures.

Pour finir avec une phrase un peu bateau (normal pour une thèse en océanographie), merci à mon père de m'avoir poussé à continuer les études malgré les vents contraires et à ma mère qui m'a soutenu dans cette voie, ce qui m'a permis de garder le cap durant toutes ces années d'études.

Introduction Générale

Les océans sont des systèmes complexes très variables comportant de nombreux forçages spatiaux et temporels à multi-échelle. Cette variabilité est généralement plus marquée dans les zones côtières. Actuellement, il n'y a pas de consensus qui aboutisse à une définition unanime des écosystèmes côtiers, mais on peut citer une définition liée aux sciences océanographiques qui a été proposée par B. Quéguiner en 2011 (Quéguiner, 2011) : "Les écosystèmes côtiers sont des entités géomorphologiques assurant la transition entre le continent et l'océan. Par rapport au domaine océanique les caractéristiques majeures de ces écosystèmes sont leur faible profondeur, leur volume restreint et l'influence des apports d'eau douce, ainsi qu'une variabilité à haute fréquence directement reliée à celle des facteurs physiques (marées, vents, débits fluviaux)".

Les écosystèmes côtiers marins sont parmi les écosystèmes les plus fertiles sur terre (Polis and Hurd, 1996). Les perturbations anthropiques qui vont impacter ces systèmes vont majoritairement toucher le premier échelon du réseau trophique, qui est principalement constitué par le phytoplancton. Les pollutions d'origine chimique engendrent des phénomènes d'eutrophisation et d'eaux rouges (Lancelot and Mathot, 1987, Ménesguen, 2003). Depuis les années 1980, les côtes de la Manche orientale sont soumises à un apparent dérèglement dans les successions d'espèces phytoplanctoniques qui ont lieu au cours des blooms printaniers. Ce dérèglement est caractérisé par des concentrations de *Phaeocystis globosa* très importantes dans ces blooms. Des études montrent que ce phénomène pourrait être dû à une combinaison entre des anomalies climatiques (Peperzak, 2003, Harley et al., 2006, Gómez and Souissi, 2008) et des rejets de sels nutritifs dans les fleuves liés à l'activité anthropique tels que les nitrates (Menesguen et al., 2001, Lefebvre, 2008, Lefebvre et al., 2008).

Contrairement à leurs homologues pélagiques, les écosystèmes côtiers ont une réponse plus rapide aux différentes perturbations qu'ils peuvent subir (Paerl, 2006, Gypens et al., 2007, Heisler et al., 2008, Spilmont et al., 2009a, Richlen et al., 2010), ce qui rend l'étude de leurs dynamiques relativement ardue.

Au cours des 20 dernières années, grâce aux multiples travaux de vulgarisation effectués par l'ensemble de la communauté scientifique, il y a eu un début de prise de conscience de la part des organisations publiques et privées de l'impact négatif que pouvait avoir l'homme sur le milieu marin. La zone littorale étant la première à être impactée par cette pollution anthropique, il va donc y avoir des retombées directes sur l'économie de toutes les villes qui bordent l'ensemble des littoraux ; étant donné que l'économie de ces villes est en grande majorité liée aux activités nautiques (pêche et transformation de poisson, activités de loisirs nautiques, stations balnéaires...). Dans ce cadre-là, de nombreux programmes internationaux (OSPAR pour OSlo PARis), nationaux (Natura 2000, parcs marins et ZNIEFF pour Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique), ayant pour objectif de contrôler l'état des zones côtières et de les amener vers un "bon état", ont vu le jour. Des réseaux de suivis de la qualité des eaux (SOMLIT, SRN et REPHY) ont été mis en place sur l'ensemble du littoral français. Les prélèvements d'eau de mer manuels liés à ces réseaux sont effectués avec une périodicité bimensuelle : par conséquent on les qualifie de réseaux basses fréquences. Il est de plus en plus manifeste que les fréquences temporelles liées à ce type de réseaux ne sont pas suffisantes pour expliquer l'ensemble des phénomènes présents en milieu côtier (Blain et al., 2004).

La miniaturisation et l'automatisation des capteurs océanographiques a permis la création de systèmes automatisés possédant des fréquences d'échantillonnage inférieures à une heure, qui sont qualifiés de hautes fréquences. Les bases de données qui résultent de ces systèmes vont permettre de palier au manque d'information des réseaux basses fréquences. Mais les outils méthodologiques qui prennent en compte la dynamique non-linéaire induite par les forçages à multi-échelle présents dans les

zones côtière, ne sont pas standardisés. Cette thèse est donc une contribution au développement et à l'adaptation de méthodes d'analyses des séries temporelles hautes fréquences à long terme dans le milieu marin. Les interactions et couplages à échelles multiples demandent une méthodologie particulière qui est capable de décrire l'intensité de ces phénomènes, compte tenu de leur caractère aléatoire. Dans ce cadre-là, les analyses spectrales généralement utilisées dans le milieu de la turbulence, seront un atout de taille dans la caractérisation de ces dynamiques à multi-échelles.

Cette étude se présente sous la forme de 3 chapitres. Le chapitre I Matériels et Méthodes expose les réseaux basse fréquence et haute fréquence dont sont issues les bases de données que nous utilisons dans cette étude, les paramètres analysés et les outils méthodologiques qui sont utilisés sur les séries temporelles. Le chapitre II est consacré à l'étude de la dynamique de la biomasse phytoplanctonique. On regarde tout d'abord la dynamique interannuelle et celle des extrêmes, puis la dépendance qui existe entre la fluorescence et les autres paramètres, par l'intermédiaire une analyse multi-variée. On utilise la méthode Empirical Mode Decomposition (EMD) et les densités de probabilités, ou Probability Density Function (PDF) pour affiner notre analyse sur la dynamique, ainsi que des analyses spectrales basées sur la transformée de Hilbert. Pour finir sur les relations entre la dynamique de fluorescence et l'impact potentiel de la stratification sur ces mécanismes.

Le chapitre III présente une étude comparative portant sur plusieurs réseaux de surveillance en milieu côtier. Dans cette optique, on débute avec deux comparaisons : les réseaux hautes fréquences versus basses fréquences et les réseaux hautes fréquences versus hautes fréquences. Puis on teste la dépendance qu'il pourrait exister entre les températures de la Manche occidentale et orientale, par l'intermédiaire de deux méthodes de cross-corrélation. La première méthode est plutôt classique et se base sur le co-spectre. Quant à la deuxième il s'agit de la méthode Time Dependent Intrinsic Correlation Analysis (TDIC) qui permet de donner

une corrélation sous la forme de plusieurs fenêtres graphiques qui ont chacune une échelle caractéristique. Ce chapitre se termine sur une comparaison des spectres de températures issues des différents systèmes automatisés hautes fréquences à travers le monde. A la fin de ce manuscrit en annexe nous avons aussi étudié la réponse de différentes méthodes spectrales au manque de données dans les séries temporelles.

Chapitre 1. Matériels et Méthodes

1. Introduction

La biodiversité présente dans les écosystèmes côtiers est la plus importante du milieu marin (Gray, 1997). Ces zones côtières sont également les premières soumises aux impacts anthropiques, tels que les rejets provenant des industries et des particuliers majoritairement transportés par les fleuves, les dragages effectués lors des opérations de désenvasement et les phénomènes de pêche intensive. Or cet impact anthropique ne va pas se limiter aux zones côtières, la pollution va transiter par ces zones avant d'être dispersée par les courants et l'activité biologique, sur l'intégralité des mers et des océans du globe (Smith, 2003).

Pour comprendre l'impact que peut exercer l'homme sur ces écosystèmes, nous avons besoin de séries temporelles à long terme, qui vont nous donner des indices pour retracer l'évolution des mécanismes présents dans le milieu et leur évolution au cours du temps. Pour répondre à ce type de problématique, L'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers) a mis en place en 1997 le programme SOMLIT (Service d'Observation en Milieu Littoral). Ce programme consiste à effectuer des relevés de manière bimensuelle en point fixe sur une radiale, en différents points du littoral français. Le Programme SOMLIT comprend la mesure de 16 paramètres biogéochimiques, qui ont été choisis pour leur pertinence en tant qu'indicateur de "l'état de santé" de l'écosystème. En 1992 IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER) a lancé son propre programme de surveillance du littoral qui a été appelé SRN (Suivi Régional des Nutriments). Les paramètres enregistrés sont quasiment les mêmes que dans le programme SOMLIT. La différence entre les deux programmes est principalement liée à la géographie des zones d'études, car contrairement à SOMLIT, le programme SRN se limite à la Manche Orientale qui comprend la région des littoraux du Pas-de-Calais et de la Picardie.

L'évolution de la technologie a permis la mise en place de systèmes capables d'effectuer des relevés de manière autonome, avec une fréquence d'échantillonnage

beaucoup plus importante. Ces systèmes automatisés sont capables d'effectuer des échantillonnages avec une périodicité s'étalant sur une plage allant de 10 minutes à 12 heures, selon la conception du système pris en compte, ou les paramètres mesurés. Une collaboration entre l'état, le FEDER (Fonds européen de Développement Economique et Régional), le conseil régional du Nord-Pas-de-Calais, l'IFREMER et le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) a permis la mise en place du système MAREL Carnot, à la sortie de la rade du port de la ville de Boulogne-sur-Mer. Notre étude portera principalement sur les données enregistrées par ce dispositif. En mars 2014 MAREL Carnot a fêté ses 10 ans de mise en service, il en résulte donc une importante série temporelle. Les paramètres enregistrés par MAREL Carnot sont quasiment les mêmes que ceux relevés par le programme SOMLIT et permettent donc un suivi de "l'état de santé" d'un écosystème. Nous comparerons les jeux de données provenant de MAREL Carnot à d'autres systèmes automatisés à point fixe d'origines diverse : à Brest, à Roscoff, au Royaume-Uni et au Canada.

La différence de périodicité entre les différents types échantillonnages nous permet de qualifier les programmes SOMLIT et SRN d'échantillonnages basses fréquences, en opposition aux échantillonnages effectués par des systèmes automatisés que nous qualifierons de hautes fréquences. Pour analyser ces séries temporelles, nous utiliserons différentes méthodes statistiques inspirées des domaines de la physique statistique et de la turbulence. Nous utiliserons aussi une méthode innovante d'analyse des séries temporelles, intitulée EMD (Empirical Mode Decomposition) (Huang et al., 1998). Elle a été proposée à la fin des années 1990, et rencontre actuellement un grand succès dans les sciences de la terre et de l'univers, avec plus de 9500 citations dans des revues internationales.

2. Présentation des réseaux d'analyses Basse fréquence

2.1 SOMLIT

Le programme SOMLIT est un service d'observation labélisé mis en place en 1997 sous la tutelle de l'INSU. Il a pour principale fonction de suivre l'évolution temporelle sur le long terme d'un ensemble de paramètres biogéochimiques le long des côtes françaises (Cariou et al., 2002). Les objectifs définis lors de la création de ce réseaux basse fréquence sont les suivants :

- Examiner les changements sur le long terme dans les écosystèmes côtiers, puis quantifier la part de variations climatiques et anthropiques.
- Homogénéiser l'acquisition d'un ensemble de paramètres (hydrologiques, climatiques, chimiques et biologiques) et les rendre accessibles à la communauté scientifique.
- Définir une situation de "normalité" sur les 3 façades du littoral français, dans le but d'effectuer des comparaisons.
- Etablir un cadre spatio-temporel pour les actions de recherche, afin d'expliquer les variations observées.

Ce réseau regroupe actuellement 9 stations marines, avec l'intégration assez récente en 2012 de la station de La Rochelle (voir le tableau 1-1. et la figure 1-1.).

Station Marine	Site de prélèvement	Coordonnées	Début de la série	Fréquence d'échantillonnage	Niveau de prélèvement
Arcachon	Eyrac	1°10'00 W 44°40'00N	Décembre 1996	2 semaines	Surface/Fond et profils
Banyuls	Sola	03°08'70E 42°29'30N	Mars 1997	1 semaine	Surface/Fond et profils
Brest	Portzic	4°33'07W 48°21'32N	Mars 1998	1 semaine	Surface
Gironde	Pk 86	0°57'00W 45°31'00N	Mars 1997	1 mois	Surface/Fond
	Pk 52	0°43'50W 45°14'80N	1978		
	Pk 30	0°40'54W 45°06'04N	1984		
La Rochelle	Antioche	1°18'30W 46°05'03N	Juin 2011	2 semaines	Surface
Luc-sur-Mer	LucL	0°20'47W 49°19'7N	Janvier 2007	2 semaines	Surface
Marseille	Frioul	05°17'30E 43°14'30N	Mars 1994	2semaines	Surface/Fond et profils
Roscoff	Estacade	3°58'58W 48°43'56N	Janvier 1985	2 semaines	Surface
	Astan	3°56'15W 48°46'40N	Janvier 2000		Surface/Fond et profils
Villefranche	Point B	7°19'00E 43°41'00N	Aout 1991	1 semaine	Surface et profils
Wimereux	Point C	1°31'17E 50°40'75N	Novembre 1995	2 semaines	Surface/Fond et profils
	Point L	1°24'60E 50°40'75N			

Tableau 1-1. Récapitulatif de toutes les stations de prélèvements SOMLIT implantées le long des trois façades maritimes. (<http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr>)



Figure 1-1. Les stations de prélèvements SOMLIT réparties le long des côtes françaises. (<http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr>)

Le protocole d'analyses SOMLIT est commun à toutes les stations du réseau. Il est basé sur le "Manuel des Analyses Chimiques en Milieu Marin" (Aminot and Chaussepied, 1983). Depuis 2006 le réseaux SOMLIT s'est aligné sur la norme NF/EN ISO/CEI 17025 et depuis 1999 une inter-comparaison est effectuée chaque année dans les différentes stations marines faisant partie du programme (voir tableau 1-2.), afin d'avoir une calibration commune des appareils de mesure, dans le but d'éviter des biais éventuels. Les différents paramètres mesurés par le réseau SOMLIT sont communs à toutes les stations et ont été choisis pour leur pertinence en tant qu'indicateur de "l'état de santé" de l'écosystème. A l'heure actuelle ces paramètres biogéochimiques sont au nombre de 16 (voir tableau 1-3.) : la température, la

fluorescence, la salinité et le P.A.R (Photosynthetically Available Radiation) sont mesurés *in situ*, par l'intermédiaire d'une sonde CTD (Conductivity Temperature Depth). Contrairement à tous les autres paramètres qui, quant à eux, sont mesurés *ex situ*, les prélèvements d'eau de mer sont tout d'abord effectués à l'aide de bouteilles Niskin, puis apportés en laboratoire pour analyses. La fréquence d'échantillonnage varie selon les stations entre 1 semaine et 1 mois. Le tableau 1 recense les différentes fréquences, ainsi que les stations qui leurs sont associées.

Dans le cadre de notre étude, nous nous focaliserons principalement sur la station SOMLIT de Wimereux. Les prélèvements sont effectués de manière bimensuelle quand le temps le permet, en Manche orientale au sud-ouest de Boulogne-sur-Mer. Ces prélèvements sont effectués à bord du N/O SEPIA et répartis sur deux zones : le point côte (1°31'17' E ; 50°40'75 N) et le point large (1°24'60 E ; 50°40'75 N). Pour les deux zones, un échantillonnage proche du fond et de la surface est effectué, en plus d'un profil CTD récolté lors de la remontée de la sonde. Dans cette étude, nous nous servirons principalement des données provenant du point côte et des données de surface.

Année	Station Organisatrice
1999	Marseille
2000	Arcachon
2001	Wimereux
2002	Banyuls
2003	Roscoff
2004	Villefranche-sur-Mer
2005	Brest
2006	Banyuls
2007	Arcachon
2008	Marseille
2009	Roscoff
2010	Luc-Sur-Mer
2011	Villefranche-sur-Mer
2012	Brest
2013	Wimereux
2014	La Rochelle

Tableau 2. Stations marines labélisées SOMLIT accueillant l'inter-comparaison pour une calibration commune. (<http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr>)

Paramètre	Type d'échantillonnage
Température	<i>In situ</i> (sonde CTD)
Fluorescence	
P.A.R (lumière)	
Salinité	
pH	<i>Ex situ</i> (Bouteille Niskin et analyses en laboratoire)
Ammonium (NH ₄)	
Nitrates (NO ₃)	
Nitrites (NO ₂)	
Phosphates (PO ₄)	
Silicates (SiOH ₄)	
Carbone Organique Particulaire (COP)	
Azote Organique Particulaire (NOP)	
Matière en suspension (MES)	
Chlorophylle a (CHLA)	
Delta Azote isotopique (Delta 15N)	
Delta carbone isotopique (Delta 13C)	
Pico et nanoplancton	

Tableau 3. Les 16 paramètres biogéochimiques communs enregistrés sur l'ensemble du réseau SOMLIT. (<http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr>)

2.2 SRN et REPHY

Le réseau SRN qui a débuté en 1992 est le fruit d'une collaboration entre l'Agence de l'Eau Artois Picardie et l'Ifremer. L'objectif principal de ce réseau est d'évaluer l'influence des apports continentaux sur le milieu côtier, sur l'ensemble des littoraux des régions Nord-Pas-de-Calais et Picardie. Les prélèvements pour ce suivi sont effectués de manière mensuelle, à part pendant les périodes de bloom printanier entre mars et juin, où la fréquence d'échantillonnage augmente de manière à devenir bimensuelle. Ce programme SRN mesure 13 paramètres biogéochimiques qui sont les suivants : la température, la salinité, la turbidité, les MES (minérales et organiques), l'ammonium, le nitrate, l'acide silicique, la chlorophylle a, les phéopigments et la biomasse phytoplanctonique totale. Ces échantillonnages sont repartis sur 3 radiales qui ont été choisies pour leurs spécificités :

- La radiale de Dunkerque qui est sous l'influence de la Mer du Nord et qui est partiellement eutrophisée.
- La radiale de la Baie de Somme qui permet l'étude de l'influence de la dynamique du fleuve.
- La radiale de Boulogne-sur-Mer qui permet de s'intéresser à l'impact fort anthropique subit dans la zone.

Un récapitulatif des radiales et de la localisation des stations, effectué au cours du programme SRN, est disponible sur le tableau 1-4.

Radiales Stations	Dunkerque	Boulogne	Baie de Somme
Station 0			BIF 50°12'88N 1°35'96N
Station 1	RNO 1 51°04'30N 2°20'20E	50°43'90N 1°33'00E	MIMER 50°13'30N 1°32'40E MIMER' 50°14'12N 1°31'08E
Station 2		OPHELIE ou APPROCHE 50°43'90N 1°30'90E	ASTO 50°13'60N 1°28'50E
Station 3	RNO 3 51°06'70N 2°17'20E	ZC1 50°45'02N 1°27'15E	MER 1 50°13'60N 1°27'20E
Station 4	RNO 4 51°09'20N 2°15'10E		MER 2 50°13'15N 1°26'75E

Tableau 1-4. Coordonnées des 3 stations SRN sur les 3 radiales. (Modifié d'après : Suivi régional des nutriments sur le littoral Nord-Pas-de-Calais/Picardie-Bilan de l'année 2005 (Lefebvre and Bonte, 2006, Lefebvre and Mégret, 2014).

l'Ifremer a aussi mis en place en 1984 un réseau de surveillance qui porte uniquement sur l'étude des taxons phytoplanctoniques et des phycotoxines. Ce programme est intitulé REPHY (Réseau de Surveillance du PHYtoplancton et des PHYcotoxines), on peut noter que le programme SRN est une adaptation régionale de ce dernier avec une extension vers le large et l'ajout de paramètres complémentaires. Contrairement au programme SRN, ce réseau ne se limite pas à la zone Manche/Mer du Nord, il est réparti sur l'ensemble des littoraux français et géré par neuf laboratoires IFREMER différents. Dans la région Nord-Pas-de-Calais, les prélèvements pour le programme REPHY sont effectués en même temps que les prélèvements SRN. Une fois les analyses en laboratoire effectuées pour les deux réseaux, les données sont centralisées dans la base de données Quadrigé2 qui est aussi gérée par l'Ifremer. Pour plus de détails sur les protocoles et les méthodes utilisées, se référer au rapport de "Suivi régional des nutriments sur le littoral Nord-Pas-de-Calais/Picardie" (Lefebvre and Bonte, 2006) disponible en libre accès sur le site internet d'Ifremer et au "Cahier des procédures REPHY" (Belin, 2001). Dans le cas de notre étude, nous nous concentrerons plus particulièrement sur les données SRN qui sont issues de la première station de la radiale effectuée dans la zone côtière de Boulogne-sur-Mer (voir figure 1-2).

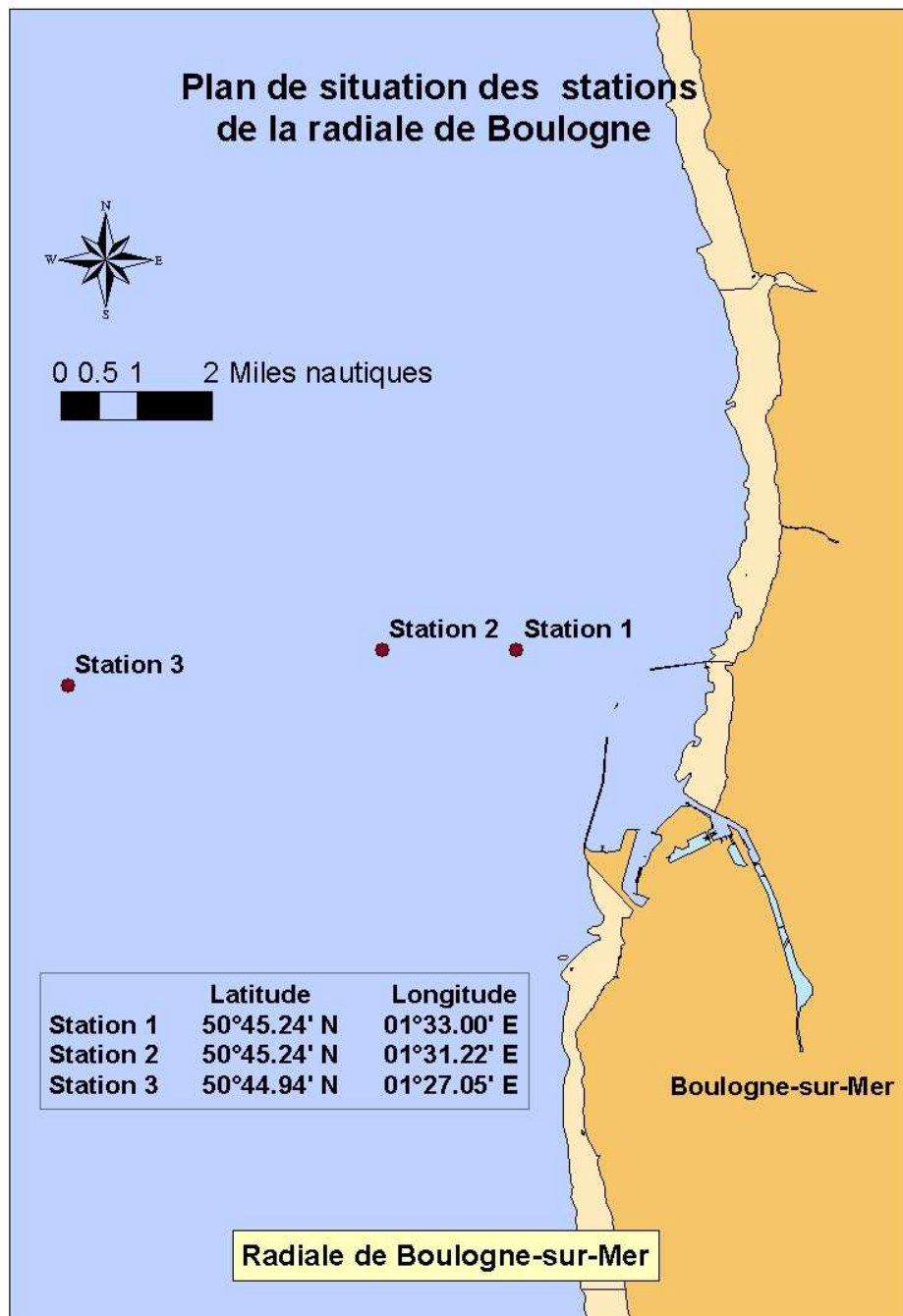


Figure 1-2. Localisation des points de prélèvements SRN le long de la radiale de Boulogne-sur-Mer. (Source : Suivi régional des nutriments sur le littoral Nord-Pas-de-Calais/Picardie-Bilan de l'année 2005 (Lefebvre and Bonte, 2006)).

3 Les réseaux automatisés hautes fréquences

3.1 Les dispositifs MAREL

Les dispositifs MAREL (Mesures Automatisées en Réseau pour l'Environnement Littoral) peuvent exister sous plusieurs formes telles que des bouées, des pylônes ou des pontons flottants. La pluralité dans les formes de ces dispositifs a pour but de s'adapter aux milieux dans lesquels elles sont implantées. Suite à un manque de budget adéquat pour l'entretien de ces stations automatisées, plusieurs d'entre elles ont été arrêtées (par exemple en Baie de Seine dans les années 2000). Grâce au gain d'information apporté par ce type de système automatisé haute fréquence et à la volonté de certaines équipes locales, plusieurs dispositifs MAREL sont toujours en service, comme par exemple MAREL Iroise, dans la rade de Brest.

3.1.1 MAREL Carnot

L'intensité et la durée des blooms de *Phaeocystis* sont en constante augmentation dans la Mer du Nord (Lancelot, 1995), qui est voisine de notre zone d'étude. Depuis quelques années, on semble pouvoir retrouver la même tendance en Manche orientale avec des blooms de *Phaeocystis* qui s'étendent sur une période de 6 à 7 semaines (Lefebvre, 2006). Malheureusement, les réseaux basses fréquences (SRN et SOMLIT) ne génèrent pas assez de données pour fournir une explication à ce phénomène. Ce qui a donné l'impulsion à la création d'un système automatisé haute fréquence, qui a aussi pour but de suivre la pollution anthropique et d'alimenter les modèles hydrodynamiques (Lefebvre, 2006). La région Nord-Pas-de-Calais, dans le cadre du CPER (Contrat de Projet Etat-Région) et d'un partenariat entre l'Etat, le FEDER, le Conseil Régional du Nord-Pas-de-Calais, l'IFREMER et l'INSU (via le CNRS), a donc fait installer un de ces dispositifs au bout de la digue Carnot (50.7404 N, 1.5676

W) et a nommé ce dernier par conséquent MAREL Carnot (voir figure 1-3). Ce dispositif qui a commencé à fonctionner en mars 2004 est toujours opérationnel et vient de fêter ses 10 ans. A l'occasion de cet anniversaire, un colloque sur l'importance des systèmes automatisés dans la compréhension des mécanismes en milieu côtier a été organisé à Boulogne-sur-Mer³.



Figure 1-3. Station MAREL Carnot installée sur la digue Carnot à la sortie de la rade du port de Boulogne-sur-Mer : la station est le tube situé à gauche du phare sur la photo. (Photographie F. G. Schmitt)

³ <http://conference-marelcarnot2014.fr/Accueil.html>

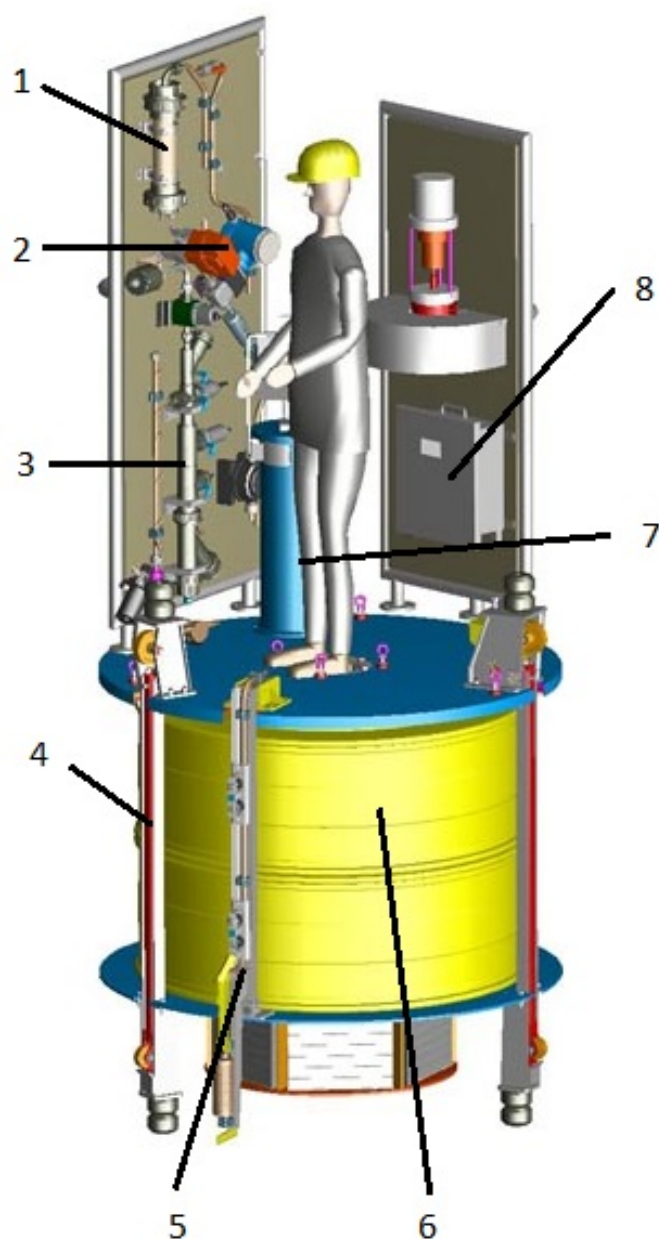


Figure 1-4. Représentation schématique du dispositif placé à l'intérieur du tube de MAREL Carnot. (1) Débulleur ; (2) Vanne et débitmètre ; (3) Chambre de mesures des paramètres physico-chimiques et système d'antifouling ; (4) Système de roulement ; (5) Perche de prélèvement ; (6) Flotteur ; (7) Analyseur de nutriments ; (8) Automate de la station de mesures.

(Source : <http://www.ifremer.fr/dtmsi/programmes/marel/marel.htm>)

Le dispositif MAREL Carnot se présente sous la forme d'une bouée fixe, munie d'un flotteur sur lequel sont installés les instruments de mesure (voir figure 1-4), qui sont capables de fonctionner de manière continue et autonome (Berthome, 1994, Woerther, 1998, Blain et al., 2004, Zongo and Schmitt, 2011a). Le flotteur a été placé dans un tube (voir figure 1-3), afin que les mesures soient effectuées à point fixe et les capteurs sont en permanence émergés à 1,5 mètre quel que soit le marnage grâce à ce système de flotteur. Le système a une fréquence d'échantillonnage de 20 minutes pour l'ensemble des paramètres pris en compte, à l'exception des sels nutritifs qui sont enregistrés toutes les 12 heures (Zongo and Schmitt, 2011b). Les paramètres relevés par MAREL Carnot sont proches de ceux mesurés par le programme SOMLIT et sont les suivants : la température de l'air et de l'eau, la salinité, la concentration en oxygène dissous et son pourcentage de saturation, le pH, la turbidité, la concentration en nitrates, phosphates et acide silicique, la fluorescence, la direction et la vitesse du vent, l'humidité relative, la pression atmosphérique et le P.A.R.. Le tableau 5 présente les principaux paramètres mesurés par la balise ainsi que leur gamme et leur incertitude.

PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES	GAMME	INCERTITUDE
Température de l'eau	-5 à +30°C	0.1 °C
Conductivité	0 à 70 mS/cm	0.3 mS/cm
Oxygène dissous	0 à 20 mg/l	0.2 mg/l
PH	6.5 à 8.5 UpH	0.2 UpH
Turbidité	0 à 4000 NTU	10 %
Chlorophylle	0 à 50 FFU	10%
PARAMETRES ADDITIONNELS		
Nitrates	0.1 à 100 µmol/l	5%
Silicates	0.1 à 100 µmol/l	5%
Phosphates	0.1 à 100 µmol/l	5%
Azote ammoniacale	0.05 à 100 µmol/l	5%
Fugacité de CO2	200 à 1000 µatm	1 µatm

Tableau 1-5. Récapitulatif des paramètres mesurés de manière automatique par la station MAREL Carnot avec les gammes des paramètres ainsi que leurs incertitudes. (Source : <http://www.ifremer.fr/dtmsi/programmes/marel/marel.htm>)

Bien que MAREL Carnot soit équipée d'un système de chloration de l'eau de mer par électrolyse pour protéger les capteurs contre le développement du biofouling (Lefebvre, 2008), cela n'empêche pas les périodes de trous dans les bases de données. Ces périodes manquantes sont principalement dues aux périodes de maintenance, aux pannes, aux bugs internet du système et au vandalisme (Dur et al., 2007). Le tableau 6 présente le pourcentage d'acquisition des principaux paramètres qui seront utilisés dans cette étude, ainsi que le nombre de données présentes.

Paramètres	Fluorescence	Température	P.A.R	Silicates	Nitrates	Phosphates
Périodes	2004 à 2011	2004 à 2010	2004 à 2011	2004 à 2009	2004 à 2009	2004 à 2009
Nombre de données présentes	168948	138574	92204	3175	3029	2719
Pourcentage d'acquisition	80%	88%	44%	72%	69%	62%
fréquence	20 min	20 min	20 min	12h	12h	12h

Tableau 1-6. Principaux paramètres de MAREL Carnot utilisés dans cette étude, ainsi que leur pourcentage d'acquisition des valeurs et leur fréquence.

Les données brutes enregistrées par le système vont être transmises deux fois par jour au centre Ifremer de Boulogne-sur-Mer, par l'intermédiaire d'une liaison GSM (Global System for Mobile). Ensuite, Ifremer va effectuer une phase de prétraitement sur les données brutes et va indexer un niveau de qualité à chaque relevé qui varie entre 0 et 9 (voir tableau 1-7). Dans le cadre de notre étude, nous prenons en compte les niveaux de qualité allant de 0 à 3 pour effectuer nos analyses.

**Niveau de qualité pour
les données MAREL**

- 0 → **Non qualifié**
- 1 → **Bon**
- 2 → **Hors statistique**
- 3 → **Douteux**
- 4 → **Faux**
- 9 → **Manquant**

tableau 1-7. Code qualité établi par Ifremer pour labéliser les données MAREL Carnot.

3.1.2 MAREL Iroise

La balise MAREL Iroise a été mise à flot au cours de l'année 2000. Elle est le résultat d'une collaboration entre l'Ifremer de Brest et l'IUEM (Institut Universitaire Européen de la Mer). Ce dispositif MAREL se présente sous forme d'une bouée immergée à point fixe (voir figure 1-5) à l'entrée de la rade de Brest (48°21'28.66" N, 4°33'05.48" O). Comme MAREL Carnot, il s'agit d'une bouée instrumentée autonome, qui possède une fréquence d'échantillonnage de 20 minutes. Mais MAREL Iroise n'enregistre que 7 paramètres physico-chimiques qui sont les suivants : la température ; la conductivité (salinité) ; l'oxygène dissous ; la turbidité ; la fluorescence de la chlorophylle ; le pH ; le CO₂ dissous ; et le P.A.R. Les prélèvements sont effectués à une profondeur de deux mètres. Dans le cadre de cette étude, nous nous intéresserons principalement aux données de fluorescence et de température issues de ce système.



Figure 1-5. Bouée MAREL Iroise dans la rade de Brest (source : Michel Répécaud ; Ifremer)

3.2 Seabird Roscoff

La station marine de Roscoff (Université Pierre et Marie Curie et le CNRS) a installé en janvier 2006, un mouillage sur le plancher océanique de la baie de Morlaix (voir figure 1-6), plus précisément au point Estacade ($3^{\circ}58.58W$, $48^{\circ}43.56N$). Contrairement aux bouées MAREL, il n'y a pas de flotteur installé sur ce dispositif, donc il reste immergé à une profondeur moyenne de 5,8 mètres. Ce mouillage a été équipé d'une sonde de type Seabird (SBE39) (voir figure 1-7) qui mesure la température avec une précision de $0.01^{\circ}C$ et la pression avec une précision de 0,1 dbar. Les données sont enregistrées avec une périodicité de 10 minutes et elles sont récupérées tous les deux mois par une équipe de plongeurs. Nous utiliserons dans cette étude les données de températures issues de cette sonde Seabird, qui nous ont été transmises par Pascal Morin.

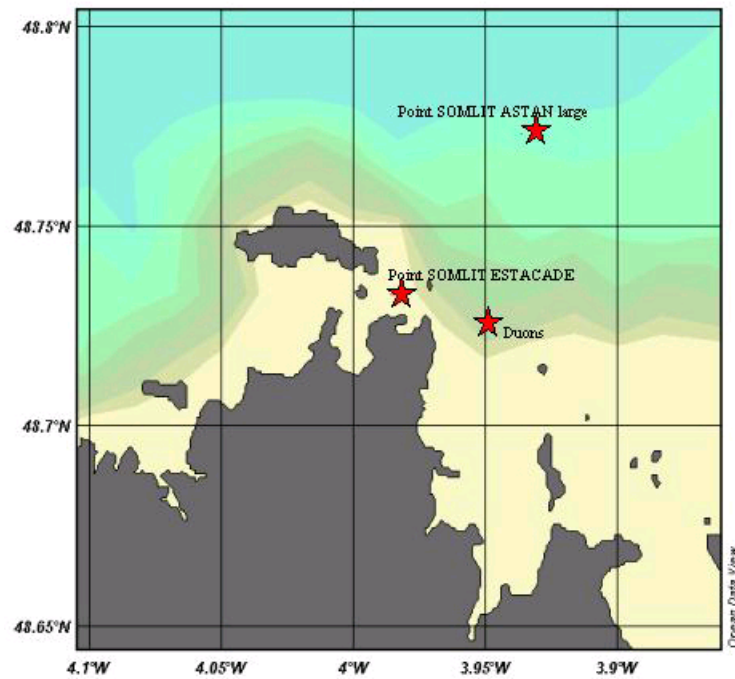


Figure 1-6. Position des stations Estacade et Astan en Manche occidentale (source : Pascal Morin)

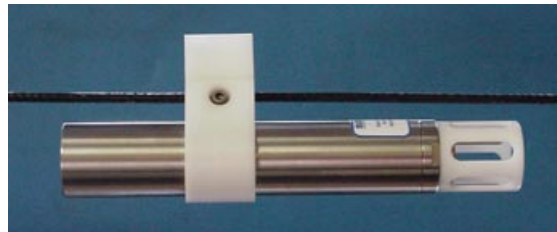


Figure 1-7. Photographie de la sonde SBE39. (source : Pascal Morin)

3.3 Station L4 (UK)

La station marine de Plymouth en Angleterre dans le cadre du programme NERC (Natural Environment Research Council) Oceans 2025, a fait installer en 1999 une bouée autonome (voir figure 1-8) en point fixe en Manche orientale ($50^{\circ} 15.0' N$; $4^{\circ}13.0' W$). Ce dispositif a été nommé "L4 station", il enregistre 10 paramètres physico-chimiques avec une périodicité d'une heure. Les paramètres pris en compte par cette balise sont les suivants : la direction et la force des vents ; la pression atmosphérique ; le P.A.R ; la température de la mer et de l'air ; la salinité ; l'oxygène ; la chlorophylle a et la turbidité. Dans le cadre de notre étude nous utiliserons principalement la température et la fluorescence issues de cette station L4.



Figure 1-8. Station L4 en Manche occidentale du côté anglais (Source : <http://www.westernchannelobservatory.org.uk/buoys.php>)

3.4 Programme VENUS (Canada)

L'université de Victoria au Canada a lancé en 2006 un programme de très grande envergure nommé VENUS (Victoria Experimental Network Under the Sea) qui s'étend sur l'intégralité du détroit de Géorgie (49° 18'N ; 123°48'W). Ce programme comprend quatre mouillages en réseau repartis sur le fond du détroit : Station East Node (profondeur 300 m); Station Centre Node (profondeur 170 m) ; Station Saanich (profondeur 100 m); Station Secondary Node (profondeur 108 m). En plus des ces mouillages, le programme comprend aussi : une ferry box ; deux gliders ; un profileur ; et un AUV (Autonomus Underwater Vehicle). Chacun des mouillages est équipé d'un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), d'un sonar, et de capteurs, qui mesurent 5 paramètres avec une périodicité de 1 minute, qui sont les suivants : l'oxygène ; la température ; la pression ; la salinité et la turbidité. Dans le cadre de notre étude nous utiliserons les données de températures issues du mouillage East Node (voir figure 1-9).

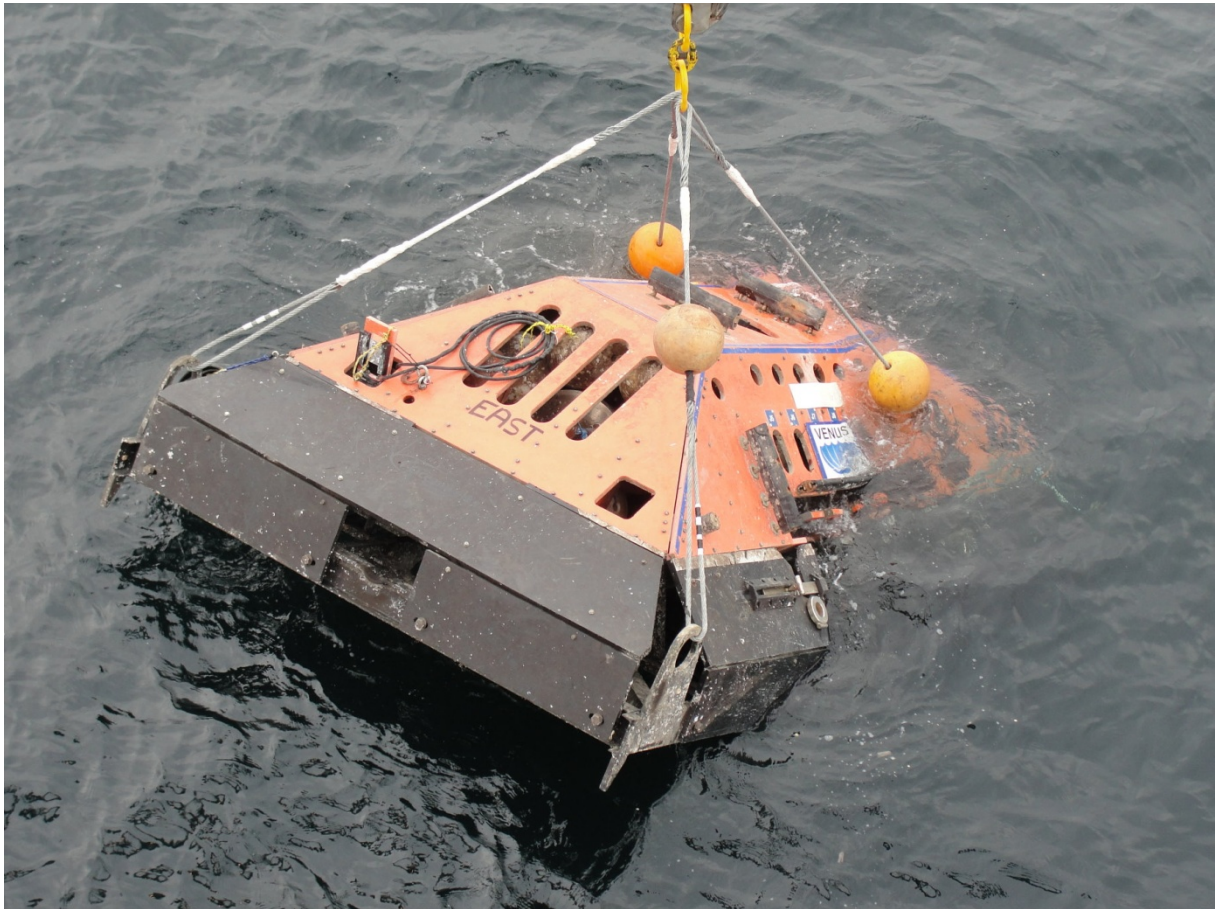


Figure 1-9. Mouillage East Node placé à une profondeur de 300 mètres sur le fond du détroit de Géorgie au Canada. (source : <http://venus.uvic.ca/>)

4 Barrage Marguet

Le pont-barrage Marguet (voir figure 1-10) se trouve entre l'embouchure de la Liane et la rade du port de Boulogne-sur-Mer. Ce barrage joue un rôle important en tant que porte d'évacuation en mer de crues via le bassin Frédéric Sauvage (Marendet and Lamps, 1989). Par sa situation géographique, la Liane est fortement impactée par les pollutions anthropiques d'origines diverses telles que les rejets industriels, urbains, et les rejets liés à l'agriculture intensive (engrais, azote, herbicides et insecticides). L'ouverture des portes du barrage Marguet pour contrôler le débit de la Liane vont permettre l'intrusion de ces pollutions d'origine anthropique dans la rade

du port de Boulogne-sur-Mer. La balise MAREL Carnot (voir paragraphe 3.1), au vu de sa localisation, risque fort d'être impactée lors de ces piques de pollutions liés à l'ouverture des portes du barrage. La direction déléguée d'exploitation du port de Boulogne-sur-Mer, par l'intermédiaire de la région Nord-Pas-de-Calais, nous a cordialement fourni les données concernant les horaires et les hauteurs d'ouvertures de la porte du barrage Marguet entre 2004 et 2012. Ce qui nous a permis de mener une rapide étude d'impact de l'influence du barrage Marguet sur la balise MAREL Carnot.



Figure 1-10. Pont-barrage Marguet à marée basse.

5. Les paramètres analysés

La section suivante référence les paramètres biogéochimiques qui sont utilisés dans cette étude. Ce choix n'a pas été effectué de manière anodine, les paramètres choisis permettent de rendre compte de l'état de santé d'un écosystème marin (voir paragraphe 2.1 SOMLIT) et sont couramment utilisés dans les programmes de surveillance sur la qualité des eaux (Aminot and Chaussepied, 1983, Aminot et al., 1998, Aminot and Kérouel, 2004).

5.1 Les sels nutritifs

Dans le milieu marin, l'oxygène, le carbone et l'hydrogène sont disponibles en abondance, contrairement à l'azote et au phosphore qui sont souvent limitants (Aminot and Kérouel, 2004). Ces deux éléments sont indispensables au développement du phytoplancton en milieu marin, certains taxons comme les diatomées et les silicoflagellés sont aussi dépendants de la silice, car leurs frustules (voir figure 1-11) ou leurs squelettes sont majoritairement constitués de cet élément. De nombreuses études ont démontré que les concentrations en milieu marin en ce qui concerne l'azote (Gentilhomme and Lizon, 1997), les phosphates (Thingstad et al., 1998) et les silicates (Martin-Jézéquel et al., 2000, Gilpin et al., 2004), sont directement sous l'influence de la biomasse phytoplanctonique. Depuis la période préindustrielle, la pollution anthropique est responsable du doublement des flux d'azote et de phosphore dans le milieu marin (Smith et al., 2003).

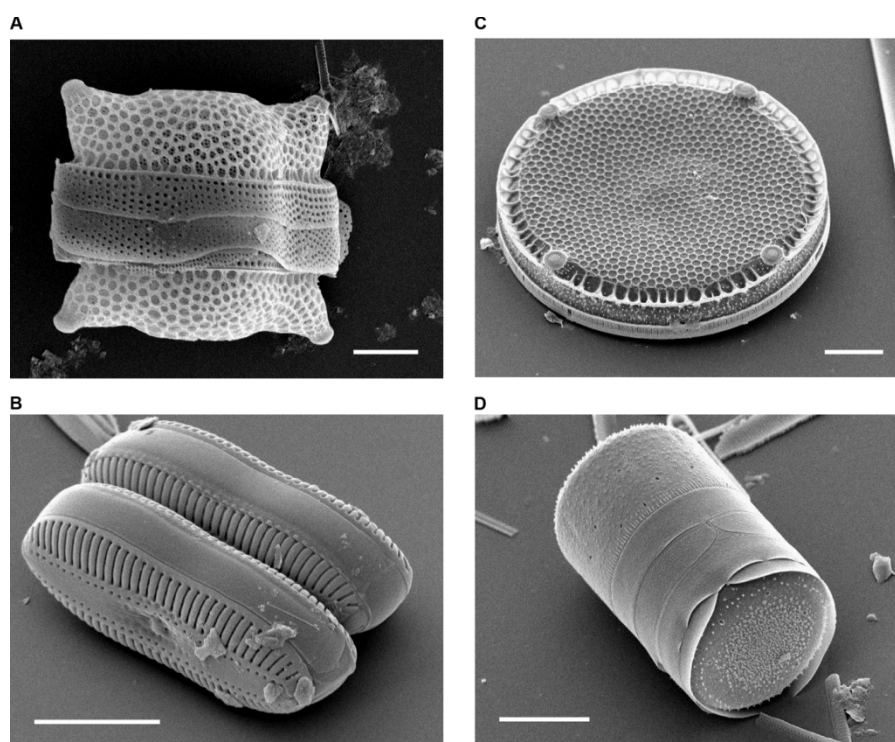


Figure 1-11. Images de frustules de diatomées issues d'un microscope électronique. (A) *Biddulphia reticulata* ; (B) *Diploneis sp.* ; (C) *Eupodiscus radiatus* ; (D) *Melosira varians*. (Bradbury, 2004)

Le phytoplancton étant majoritairement responsable de la production primaire en milieu marin, c'est-à-dire qu'il transforme la matière minérale en matière organique, un dérèglement dans les flux de sels nutritifs va avoir un impact, par un effet de cascade, sur tout le reste du réseau trophique. Par conséquent si le premier échelon du réseaux trophique d'un écosystème est impacté, cet impact va se faire ressentir sur l'intégralité de l'écosystème. D'où l'importance de comprendre et de surveiller les flux et concentrations de nitrates, silicates et phosphates dans le milieu marin. Dans cette étude, nous étudierons donc principalement les sels nutritifs suivants : les nitrates, les nitrites, l'ammonium, les phosphates et l'acide silicique.

5.2 Les différents proxy de la biomasse et le P.A.R

La Chlorophylle a est le principal pigment responsable des mécanismes de photosynthèse. Il est utilisé comme indicateur ou "proxy" de la biomasse phytoplanctonique (Neal et al., 2006). La chlorophylle a est probablement le paramètre biochimique le plus mesuré en océanographie (Jeffrey and Mantoura, 1997). Ce proxy est lié à un paradigme, il est communément admis que le rapport carbone sur chlorophylle a ($[C]/[Chl\ a]$) varie peu, avec des valeurs généralement comprises entre 40 et 50. Mais dans certains cas, si le milieu est fortement oligotrophe ou inversement, fortement eutrophe, ce rapport peut considérablement varier, les concentrations de certaines espèces phytoplanctoniques peuvent aussi influencer ce rapport (Eppley et al., 1977). Ce rapport pourrait donc au final varier entre 10 et 300 (Cloern et al., 1995), mais apparemment cette gamme de variations extrêmes n'est pas présente dans nos régions, ce qui en fait globalement un bon traceur de la biomasse phytoplanctonique (Aminot and Kérouel, 2004). Il est aussi important de noter que dans cette étude, certains programmes comme SOMLIT ou SRN mesurent la chlorophylle a *ex situ* en laboratoire par une méthode de filtration. Dans ce cas, l'unité de mesure de la chlorophylle a sera en $\mu\text{g/L}$. Alors que globalement, les systèmes automatisés comme MAREL Carnot par exemple, effectuent ces mesures de manière *in situ* et ce paramètre sera donc mesuré en FFU (Fluoresceine Fluorescence Unit). La dualité dans les unités utilisées pour le proxy de la biomasse phytoplanctonique ne représente pas un frein dans notre étude, car nous nous concentrons ici sur l'étude de sa dynamique.

Les organismes photosynthétiques requièrent un apport extérieur de photons, pour mettre en marche leur mécanisme de photo-respiration indispensable à leur survie. C'est par conséquent la lumière qui va globalement être le principal facteur limitant de la production primaire marine (Hesse et al., 1995). La chlorophylle a présente en milieu aqueux possède 2 maximums d'absorption spectrale, le premier est

aux environs de 430-440 nm (violet-bleu) et le deuxième se situe aux environs de 670nm (rouge-orange) (Raven et al., 2005). Les capteurs de P.A.R mesurent la lumière pour un spectre compris entre 400 et 700 nm, ce qui leur permet de couvrir entièrement la gamme spectrale de la chlorophylle a. La forme de ces capteurs est généralement sphérique, ce qui leur permet une captation de lumière provenant de n'importe quelle direction. Le P.A.R est un acronyme anglais pour "Photosynthetically Available Radiation" et il se mesure en micro-Einstein par centimètre carré par seconde.

5.3 La température et la salinité

La plupart des sondes et des programmes océanographiques mesure les paramètres de température et de salinité, car ils sont considérés comme des indicateurs de base pour la connaissance d'un milieu marin (Guilyardi, 2001). Les températures dans les masses d'eau de surface sont beaucoup plus soumises aux variations saisonnières que leurs homologues en profondeur. La température et la salinité sont responsables de la stratification entre les différentes masses d'eau présentes dans les océans. Les brusques variations saisonnières des températures de surface sont l'un des principaux facteurs liés au déclenchement des blooms phytoplanctoniques printaniers (Peterson, 1979). Ce phénomène est nommé "production nouvelle" et les températures vont continuer à jouer un rôle dans le maintien dans le temps de ce bloom printanier, avec les mécanismes liés à la "production régénérée" (Bode et al., 2002). La définition et la calibration des sondes de température sont actuellement soumises à une échelle internationale appelée ITS-90 (Preston-Thomas, 1990, Lide, 2004).

La salinité, qui était anciennement exprimée en ‰ ou en PSU (Practical Salinity Unit), est aujourd'hui exprimée sans unité. Cette salinité avoisine généralement les 35 sur les océans du globe, elle va diminuer vers l'Equateur et les pôles (Aminot and Kérouel, 2004), et augmenter dans les mers comme par exemple en Méditerranée.

Comme pour la température, la salinité possède une définition internationale appelée PSS78 (Lewis and Perkin, 1981), et l'utilisation de cette définition est recommandée par l'Unesco (United Nations Educational Scientific and Cultural Organization). La salinité est mesurée indirectement par l'intermédiaire de la conductivité présente dans l'eau de mer, plus la salinité est élevée, plus la concentration en sel dissous va être importante. Selon la PSS78, la conversion de la mesure résultant du conductimètre vers la valeur de salinité doit être effectuée à pression et température définies et constantes. En océanographie, la salinité est souvent utilisée comme traceur des masses d'eau douce. Couplée à la température elle permet le calcul des masses volumiques de l'eau de mer (Dauvin et al., 1989, Sournia and Birrien, 1995). Cette combinaison température/salinité est aussi couramment utilisée en océanographie physique avec les diagrammes TS (Température Salinité) pour caractériser les différentes masses d'eau et comprendre la circulation océanique (Newton and Mudge, 2003). La température et la salinité interviennent dans beaucoup d'autres paramètres mesurés en science de l'environnement. Par exemple, le pH dépend de la température, et les relevés d'oxygène dissous sont, quant à eux, dépendant de nos deux paramètres c.-à-d. la salinité et la température (Aminot and Kérouel, 2004).

6 Les outils méthodologique

6.1 Rappels sur la théorie de la turbulence

Dans cette étude, nous utilisons des outils qui proviennent du domaine de la turbulence. En mécanique des fluides, les équations de Navier-Stokes ont été établies au 19^{ème} siècle (Pope, 2000) dans le but de décrire le mouvement des fluides newtoniens. Ces équations s'écrivent pour un fluide incompressible :

$$\partial_t u + (u \cdot \nabla)u = \frac{\nabla p}{\rho} + \nu \Delta u + f, \quad \nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

où u est le vecteur vitesse, p la pression, ρ la densité, f une force extérieure et ν la viscosité cinématique. L'écoulement est contrôlé par le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (2)$$

Avec U une vitesse typique et L une échelle typique. Lorsque le nombre de Reynolds est élevé, l'écoulement est turbulent et lorsqu'il est faible, l'écoulement est laminaire. Dans l'océan, si on prend $U \approx 1 \text{ m/s}$, $L \approx 100 \text{ m}$, (système côtier) et $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ on a $Re = 10^8$ ce qui correspond à une situation fortement turbulente appelée "turbulence pleinement développée". Ces équations non-linéaires de Navier-Stokes sont le dernier domaine de la physique classique non résolu mathématiquement (Feynman et al., 1965, Tsinober, 2001). Néanmoins, des approches statistiques simplifiées existent comme la célèbre loi de Kolmogorov (Kolmogorov, 1941). Pour illustrer cela, on peut citer une phrase d'un météorologue du début du 20^{ème} siècle (Richardson, 1922) : *"Les gros tourbillons ont de petits tourbillons qui se nourrissent de leur vitesse et les petits tourbillons en ont de plus petits et ainsi jusqu'à la viscosité"*. Ce transfert d'énergie en cascade des grandes échelles vers les petites échelles, jusqu'à arriver à échelle de la viscosité, est illustré en figure 1-12.

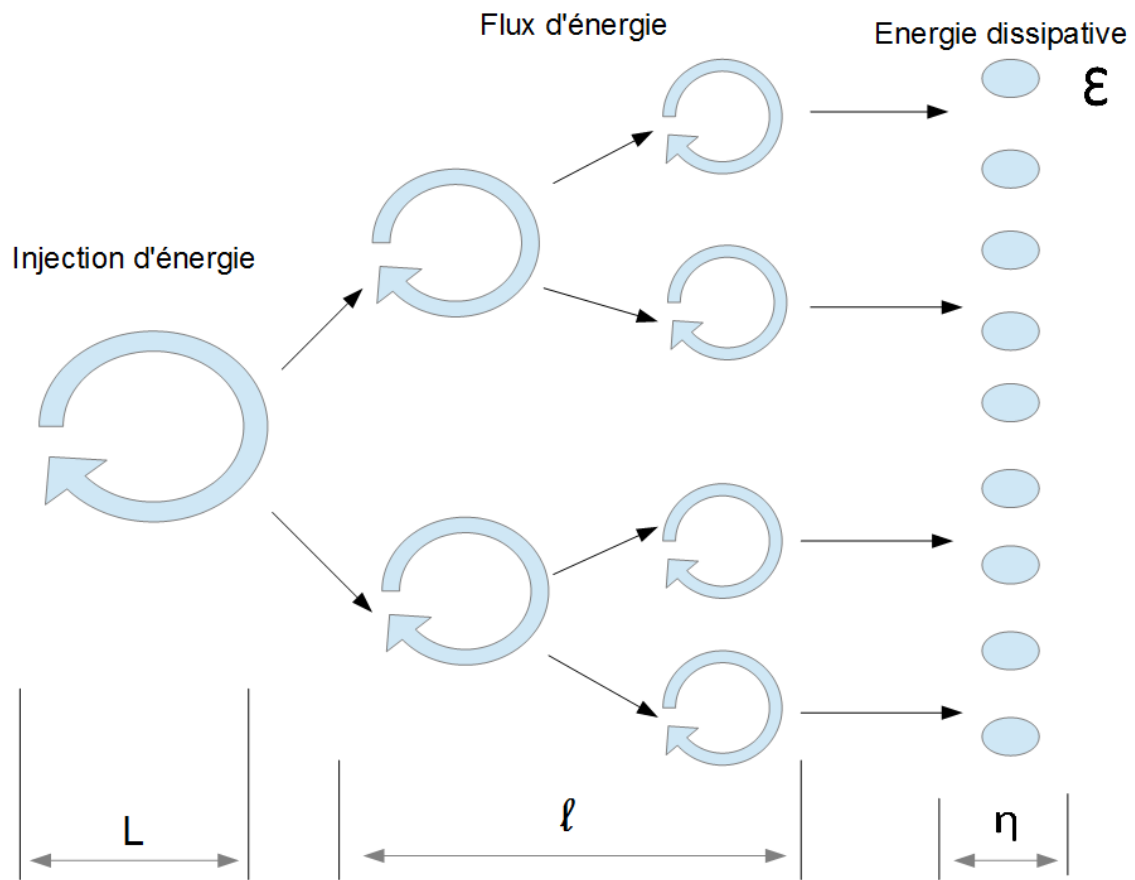


Figure 1-12. Cascade de Richardson, (L) grande échelles ; (η) échelle de Kolmogorov ; échelles intermédiaires ; (ϵ) dissipation.

Reprenant les idées de Richardson, Kolmogorov en 1941 a proposé une analyse dimensionnelle pour décrire les fluctuations de la vitesse (Δv_l), sous la forme suivante :

$$\Delta V_l = C \epsilon^{1/3} l^{1/3} \quad (3)$$

Avec ϵ qui représente la dissipation et l l'échelle de longueur. Cette relation est vérifiée dans domaine, qu'on appelle "régime inertiel", donné par l'intervalle suivant :

$$\eta \leq l \leq L \quad (4)$$

où L est l'échelle d'injection d'énergie (grande échelle) et η est la plus petite échelle de ce régime inertiel. En raison de la viscosité du fluide, l'énergie est convertie en chaleur pour les échelles de l'ordre de grandeur de η et plus petites. Dans la littérature η est appelée "échelle de Kolmogorov" et est exprimée de la manière suivante (Tennekes and Lumley, 1972) :

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (5)$$

Dans l'océan, la viscosité ν dépend faiblement de la température (ν varie de 0,8 à 1,5.10-6 m²/s) et donc η dépend surtout de l'écoulement et de la valeur de ε . Plus la dissipation est forte, plus η est petite. En pratique η varie de 0,1 à 10 mm. Cette échelle sépare le régime turbulent des régimes visqueux. Un étudiant de Kolmogorov, a utilisé les spectres de puissance (voir ci-dessous) issus des champs de vitesses pour obtenir la loi de puissance en "5/3" (Obukhov, 1941) :

$$E(k) = C_0 \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (6)$$

où C_0 est la constante de Kolmogorov, K le nombre d'ondes et E la densité spectrale d'énergie (Preumont, 1990, Frisch, 1995). Ces deux exposants de 1/3 (voir équation 3) et 5/3 (voir équation 6) sont équivalents mathématiquement et ont été vérifiés dans de nombreuses expériences (Grant et al., 1962, Anselmet et al., 1984). Pour un scalaire passif advecté par la turbulence, comme la température, la salinité, ou la concentration d'une quantité chimique inerte, on a aussi une loi d'échelle dans le domaine spectral :

$$E_{\theta}(k) = C_{\theta} \varepsilon^{-1/3} \chi k^{-5/3} \quad (7)$$

où χ est la dissipation de variance de scalaire passif (équivalent de la dissipation ε pour le champ θ). Cette loi, due à Obukhov et Corrsin (Obukhov, 1941, Corrsin, 1951) caractérise un scalaire passif. Lorsqu'on obtient un spectre de $-5/3$ pour la fluorescence, pour certaines échelles, on peut supposer que le phytoplancton est un scalaire passif pour ces échelles, et donc que la physique (advection turbulente) a dominé la biologie (Platt and Denman, 1975, Seuront et al., 1996b, Seuront et al., 1996a, Seuront et al., 1999). Réciproquement, lorsque le spectre est différent de $5/3$ on peut supposer une activité biologique ou biogéochimique.

6.2 La méthode EMD

La méthode de décomposition modale empirique (EMD en anglais pour Empirical Mode Decomposition), est une méthode d'analyse récente en temps-fréquence qui est particulièrement adaptée pour les séries temporelles non-linéaires et non-stationnaires (Huang, 2009, Flandrin et al., 2004). Cette méthode a été proposée il y a une quinzaine d'années par des scientifiques de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) (Huang et al., 1998). Durant ces quinze dernières années, plus de 9500 articles ont utilisé cette méthode. Ces utilisations ont été effectuées dans des domaines très variés qui vont de l'analyse des roulement à billes (Yu et al., 2005) aux réseaux neuronaux (Deng et al., 2001), en passant par les analyses sur l'ADN (Bai et al., 2011). La méthode EMD permet de décomposer une série temporelle en une somme de séries temporelles appelées "modes", chacune ayant une fréquence caractéristique. La décomposition est faite de manière itérative, en considérant à chaque étape le signal comme étant la somme d'une composante basse fréquence et d'une composante haute fréquence (Rilling et al., 2003). Empiriquement, une série temporelle multi-échelle comportant N point sera

décomposée en n mode, avec $n \approx \log_2 N$ (Flandrin et al., 2004, Huang et al., 1998, Schmitt et al., 2009). A la fin de la décomposition, la méthode exprime une série temporelle $x(t)$ comme la somme d'un nombre fini de modes $C_i(t)$ et d'un résidu final $r(t)$ (Huang et al., 1998) :

$$X(t) = \sum_{i=1}^n C_i(t) + r(t) \quad (8)$$

La méthode EMD est aussi utilisée pour lisser une série temporelle, ou en extraire une tendance. Cette opération peut être réalisée en sélectionnant un mode n_0 correspondant à une fréquence donnée au-dessus de laquelle le lissage est effectué. On peut donc écrire la série temporelle d'origine comme une tendance (en version lissée) et un terme haute fréquence $x'(t)$:

$$X(t) = \bar{X}(t) + x'(t) \quad (9)$$

où la tendance et la haute fréquence s'écrivent :

$$\bar{X}(t) = \sum_{i=n_0}^n C_i(t) + r(t) \quad (10)$$

$$x'(t) = \sum_{i=1}^{n_0-1} C_i(t) \quad (11)$$

Ici le mode n_0 sépare la tendance et la haute fréquence. Un exemple de filtration effectuée sur un mouvement brownien avec la méthode EMD est présenté en la figure 1-13 et on peut aussi voir la décomposition EMD de ce mouvement brownien en figure

1-14. Nous verrons dans les prochains paragraphes que cette méthode peut également être utilisée pour les études spectrales et pour effectuer des comparaisons de séries temporelles en fonction de leurs fréquences.

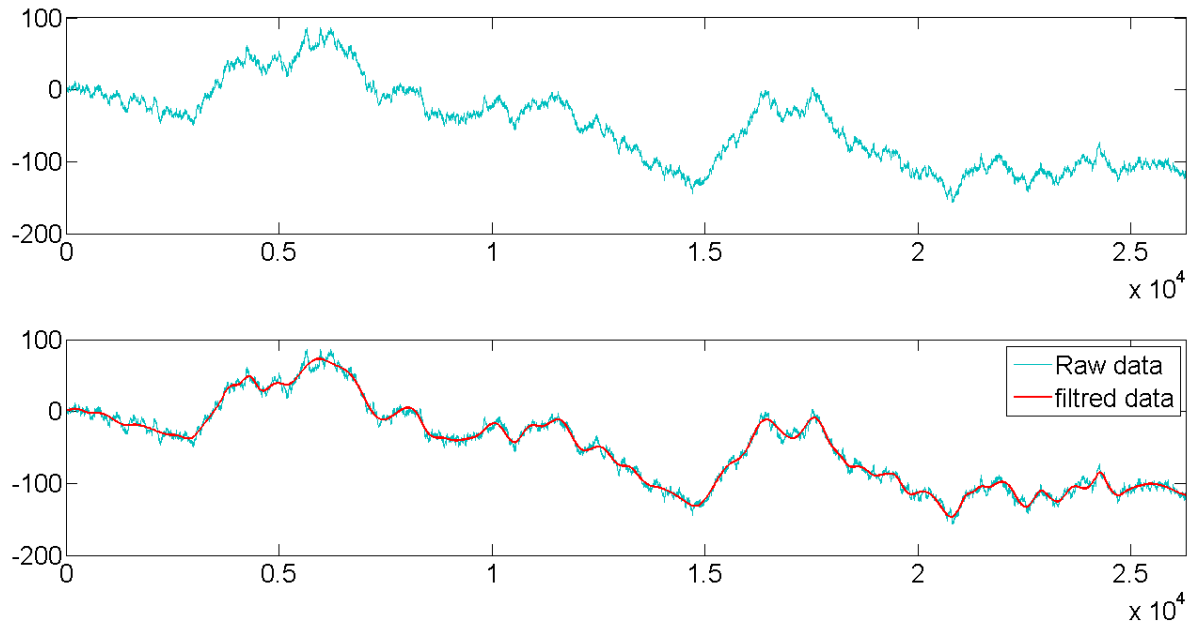


Figure 1-13. En haut : le mouvement brownien ; En bas : exemple de filtration EMD à partir du mode 9.

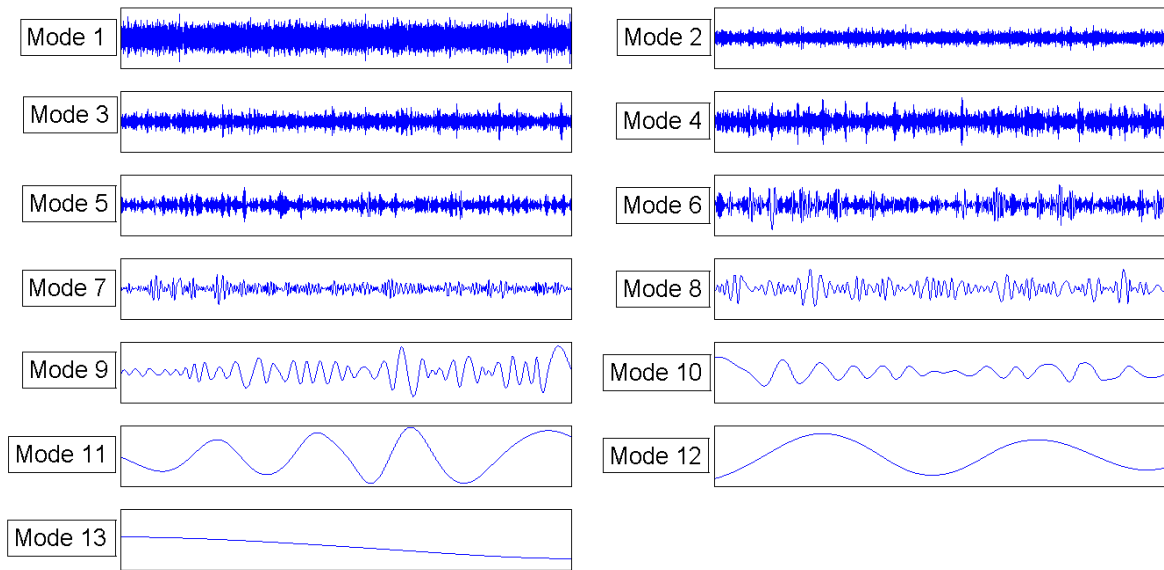


Figure 1-14. Décomposition EMD mode à mode effectuée à partir du mouvement brownien présent en figure 12. Les modes 1 à 12 vont de la haute fréquence à la basse fréquence.

6.3 Rappels de statistiques et probabilité

6.3.1 Les Fonctions de densité de probabilité

La densité de probabilité (PDF en anglais) est une fonction $p(x)$ qui représente une probabilité, et qui a les 2 propriétés suivantes :

- $p(x) \geq 0$
- $\int p(t)dt = 1$

La seconde propriété indique que la somme des probabilités vaut 1. Ensuite, la probabilité que x soit entre a et b s'écrit :

$$P(a < X \leq b) = \int_a^b f(u)du \quad (12)$$

On peut aussi noter la fonction de répartition :

$$F(x) = \Pr(x \geq a) = \int_a^{\infty} p(t)dt \quad (13)$$

Il existe une infinité de lois $p(x)$ discrètes ou continues. Nous référons à Evans (Evans et al., 2001) pour une liste des propriétés de certaines lois plus classiques. La loi normale ou Gaussienne commune à la PDF suivante :

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (14)$$

où μ est la moyenne et σ l'écart type. La loi normale a comme particularité le fait d'avoir des extrêmes qui décroissent de façon très rapide, en $e^{-\lambda x^2}$ ($\lambda > 0$). D'un autre côté, une loi très répandue en biologie marine pour représenter l'abondance des espèces, est la loi log-normale. Cette loi suppose que le log de la variable ait une PDF normale. Son expression mathématique est la suivante :

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (15)$$

où μ est la moyenne et σ l'écart type de $\log(x)$. En biologie marine, la loi log-normale est utilisée de façon quasi systématique pour approximer les données liées à l'abondance qui comporte de fortes fluctuations, sans qu'il n'y ait vraiment de justification réelle et sans que cette loi soit explicitement mentionnée. Des tests statistiques sont appliqués de manière classique sur $\log(A+1)$ où A est l'abondance (Wang et al., 2006, Widdicombe et al., 2010, Feuchtmayr et al., 2012). La valeur "+1" a été implémentée pour éviter les problèmes liés au $\log(0)$. D'après la définition même

de la formule, cela implique que le logarithme de l'abondance est distribué de manière à suivre une loi normale (équation (14)), donc que la PDF de l'abondance est log-normale.

Un autre type de loi correspond à des décroissances en loi de puissance pour les grandes valeurs, de la forme :

$$p(x) = Cx^{-\alpha} \quad (16)$$

où C est une constante et α un exposant de loi de puissance. Les lois de puissance permettent de décrire des phénomènes qui contiennent une invariance d'échelle (Clauset et al., 2009). Dans une représentation log-log, cette loi va se présenter sous la forme d'une droite. Ce type de loi est utilisé dans de nombreux domaines scientifiques, tels que celui de la physique fondamentale (Klein and Meakin, 1989, Choptuik, 1993), et des sciences économiques (Gabaix et al., 2003). L'application la plus connue de cette loi reste liée aux sciences de la terre, dans le cadre de l'étude des tremblements de terre, il s'agit de l'échelle de Richter (Gutenberg and Richter, 1956). Lorsque la constante de puissance $\alpha = 2$, on obtient la loi de Cauchy. Cette loi ne possède ni écart type, ni espérance, et elle n'a pas de moyenne ; on utilise la médiane à la place. La loi des grands nombres ne s'y applique pas et elle possède des probabilités à queue longue. La loi de Cauchy est définie de la manière suivante :

$$p(x; x_0, a) = \frac{1}{\pi} \left[\frac{a}{(x - x_0)^2 + a^2} \right] \quad (17)$$

où x_0 et a sont des constantes. Un comparatif entre la loi log-normale et la loi de puissance est effectué dans cette étude au niveau du paramètre de fluorescence, afin de voir la loi qui approxime le mieux le proxy de cette abondance phytoplanctonique dans notre zone d'étude.

6.3.2 Energie spectrale : spectre d'énergie en espace de Fourier

Les analyses spectrales sont utilisées depuis longtemps dans le domaine de l'océanographie (Legendre and Legendre, 2012, Platt and Denman, 1975, Seuront et al., 1996a, Seuront et al., 1996b, Schmitt et al., 2008, Grant et al., 1962). Pour une série temporelle $x(t)$, son spectre d'énergie $E_x(f)$ indique comment l'énergie de cette série temporelle va varier en fonction de la fréquence f . Le spectre d'énergie $E_x(f)$ selon sa définition correspond au module au carré de la transformée de Fourier :

$$E_x(f) = |\hat{V}(f)|^2 \quad (18)$$

où $\hat{V}(f)$ est la transformée de Fourier de X :

$$\hat{V}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi f t} X(t) dt \quad (19)$$

L'estimation des spectres d'énergie par la méthode FFT requiert qu'il y ait une équidistance dans la série temporelle $x(t)$, ce qui va poser un problème dans notre cas : les bases de données issues de systèmes automatisés comportent souvent des valeurs manquantes (voir paragraphe 3). La fonction d'auto-corrélation exprimée par la relation de Wiener-Khinchine (Bendat and Piersol, 2011, Lampard, 1954), appliquée en amont de la méthode FFT, est un moyen de remédier à ce problème (Dur et al., 2007). La relation de Wiener-Khinchine exprime le fait que le spectre d'énergie est la "cosinus" transformée de Fourier de la fonction d'auto-corrélation :

$$E_x(f) = 2 \int_0^{\infty} R(t) \cos 2\pi f t dt \quad (20)$$

où
$$R(\tau) = \overline{x(t)x(t + \tau)} \quad (21)$$

Une étude comparative entre ces différentes méthodes spectrales a été réalisée en annexe 1.

6.3.3 Analyse spectrale de Hilbert et méthode EMD

Nous avons déjà vu dans le paragraphe 4.2 que la méthode EMD pouvait être utilisée pour décomposer et filtrer un signal. Nous allons maintenant introduire une deuxième étape, la transformée de Hilbert-Huang. Cette transformée va nous permettre de réaliser l'analyse spectrale de Hilbert ou en anglais la HSA (Hilbert Spectral Analysis) (Huang et al., 1998, Huang et al., 1999). La transformée de Hilbert $C(t)$ est défini comme suit :

$$\tilde{C}(t) = \frac{1}{\pi} P \int_0^{+\infty} \frac{C(t')}{t - t'} dt' \quad (22)$$

où ' P ' désigne la valeurs principale de Cauchy (Cohen, 1995, Long et al., 1995, Huang et al., 1998). La transformée de Hilbert de chaque mode, issu d'une série temporelle de départ, est calculée, puis utilisée pour calculer un signal analytique ($Y = C + j\tilde{C}$), c'est-à-dire qu'on obtient un nombre complexe avec sa partie réelle, qui correspond au mode, et sa partie imaginaire, qui correspond à la transformée de Hilbert de ce mode. Ensuite, à partir de ce signal analytique, on calcule la fréquence instantanée et l'amplitude :

$$Y = A(t)e^{j\theta(t)} \quad (23)$$

où $A(t)$ est l'amplitude instantané, $\theta(t)$ la phase donnant $\omega(t)=d\theta/dt$ la fréquence instantanée.

La HSA est une technique d'analyse de la fréquence en temps/amplitude; ce qui signifie qu'à chaque pas de temps, une amplitude et une fréquence peuvent être extraites pour chaque mode. En considérant l'intégralité de la méthode EMD-HSA, on obtient à chaque pas de temps, n valeurs de fréquences et d'amplitudes (une valeur pour chaque mode). L'énergie locale est $A^2(\omega, t)$, où A est l'amplitude et ω le temps, et on peut exprimer le spectre de puissance de Hilbert comme suit :

$$h(\omega) = \frac{1}{T} \int_1^T A^2(\omega, t) dt \quad (24)$$

où T est la période de temps pour calculer le spectre. Cette approche, qui utilise la méthode HSA pour le calcul d'un spectre de puissance, est très similaire à celle utilisée pour les spectres de puissance de Fourier (Kantz and Schreiber, 2004) : il a été démontré que les spectres de puissance de Hilbert et de Fourier avaient le même comportement pour les processus d'échelle (Huang et al., 2008, Huang et al., 2009, Huang, 2009). Dans cette étude, nous utiliserons principalement la méthode HSA dans les analyses spectrales, car cet algorithme peut être utilisé avec des données irrégulières (Huang, 2009, Huang and Schmitt, 2014), ce qui inclut les bases de données possédant des valeurs manquantes. La figure 1-15 montre une comparaison entre le spectre de Fourier et le spectre de Hilbert, pour des données de turbulence, issues de la thèse de Yongxiang Huang, soutenu en 2009.

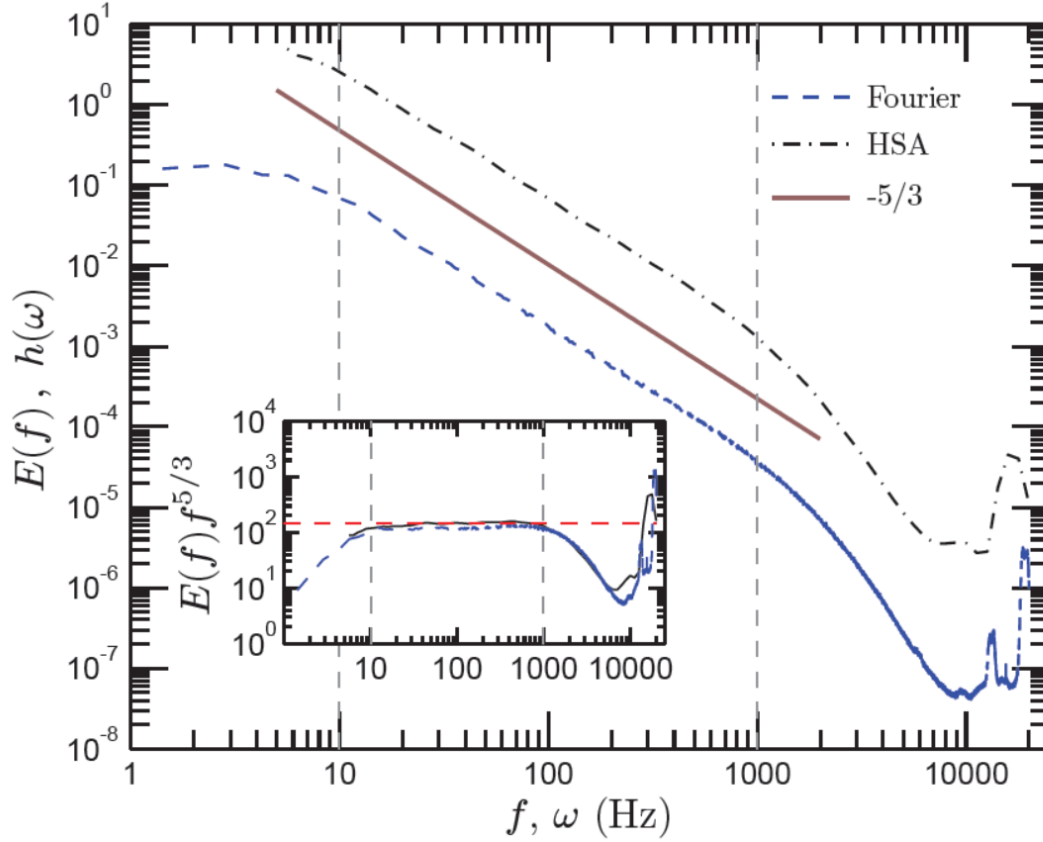


Figure 1-15. Comparaison du spectre de Hilbert (ligne pointillé mixte) et du spectre de Fourier (ligne pointillée) (Huang, 2009).

6.4 Méthodes comparatives entre séries temporelles

6.4.1 Co-spectre

Le co-spectre, ou spectre croisé, est un outil statistique qui permet de caractériser l'ampleur de la transition énergétique entre deux paramètres. En d'autres termes, on regarde le niveau de co-variabilité entre deux séries temporelles T_1 et T_2 . Pour cela, on considère la cohérence spectrale R_{T_1, T_2} comme suit (Bendat and Piersol, 2011) :

$$R_{T_1, T_2}(f) = \frac{|E_{T_1, T_2}(f)|}{\sqrt{E_{T_1}(f)E_{T_2}(f)}} \quad (24)$$

où $|E_{T_1, T_2}(f)|$ équivaux au module du co-spectre et $\sqrt{E_{T_1}(f)E_{T_2}(f)}$ correspond à la racine carrée du produit des deux spectres.

$$E_{T_1, T_2}(f) = \widehat{T_1}(f)\widehat{T_2}^*(f) \quad (25)$$

où x^* est le conjugué de x . On voit que E_{T_1, T_2} est en général complexe, d'où le module. Quand il y a une relation linéaire entre les T_1 et T_2 , la cohérence R est égale à 1 (Lumley, 2007, Lumley, 1970). Donc si R est plat, on suppose une dépendance entre les deux bases de données utilisées en entrée. Inversement, quand la cohérence R est proche de 0, on peut supposer que les processus sont décorrélés. Dans notre étude, cette méthode sera utilisée pour comparer les données issues de différents systèmes automatisés qui enregistrent des paramètres communs, afin de voir s'il existe une liaison dynamique entre les zones considérées.

6.4.2 TDIC

La méthode TDIC (Time Dependent Intrinsic Correlation Analysis) est une nouvelle méthode de cross-corrélation basée sur la méthode EMD (voir paragraphe 6.2). Cette dernière utilise la méthode EMD pour estimer une fenêtre adaptative, dans le but de calculer la corrélation intrinsèque en fonction du temps (Chen et al., 2010). L'idée en effet, est de considérer que la corrélation classique demande que les séries en entrée soient stationnaires. La méthode TDIC s'applique à des séries non stationnaires et permet de considérer une corrélation locale à une échelle donnée. En ce sens, cette méthode est une généralisation de la corrélation classique. Pour chaque

paire de modes, cette corrélation intrinsèque en fonction du temps (TDIC) est définie comme suit :

$$R_{ij}(t_k^n) = \text{Corr}(C_{1,i}(t_w^n)C_{2,j}(t_w^n)) \quad (26)$$

où Corr est le coefficient de cross-corrélation des deux séries temporelles et $t_w^n = [t_k - nt_d/2 : t_k + nt_d/2]$. La taille minimale de la fenêtre glissante pour estimer une corrélation locale a été choisie comme suit : $T_d = \max(T_{1i}(t_k), T_{2j}(t_k))$, où T_{1i} et T_{2j} sont les périodes instantanée $T = \omega^{-1}$, et n est un nombre réel positif (Chen et al., 2010).

Cette méthode conserve les mêmes avantages que la méthode EMD, c'est-à-dire que les analyses effectuées ne sont pas sensibles à la non-stationnarité et non-linéarité des bases de données utilisées en entrée (Flandrin et al., 2004, Huang et al., 1999, Huang et al., 1998). Contrairement à la méthode des co-spectres, la méthode TDIC a aussi l'avantage nous donner une corrélation sous la forme d'un graphique pour chaque échelle caractéristique. Ici, pour réaliser la méthode TDIC, nous utilisons un code en langage Matlab écrit par Yongxiang Huang (Huang and Schmitt, 2014). Ce code est lui même basé sur un code écrit par Chen et Huang (Chen et al., 2010)⁴.

7 Le langage de programmation Matlab

Matlab est un langage de programmation développé par la société Mathwork en 1984 ; son nom vient du diminutif anglais de "Matrix Laboratory". Ce langage a été inventé à la fin des années 1970 par le mathématicien Cleve Moler, à partir des bibliothèques Fortran, LINPACK et EISPACK (Moler, 1980a, Moler, 1980b). Cela permet

⁴ Le code TDIC est disponible en libre accès sur le site web suivant :

http://www.fg-schmitt.fr/EMD_and_multifractals.html.

d'effectuer des calculs rapidement ou d'utiliser des bases de données importantes. Il a aussi l'avantage de pouvoir directement effectuer des calculs matriciels. Par conséquent, sans ce type de logiciel, il nous serait impossible d'effectuer les analyses spectrales de manière interannuelle (plus de 200000 points) sans saturer la mémoire vive de nos ordinateurs. Matlab permet la création de scripts et de fonctions qui peuvent être appelés indépendamment ou combinés, afin de reproduire un même type d'algorithme sur des bases de données différentes. Il existe aussi une communauté importante qui implante des "toolbox" à ce logiciel, en plus de l'éditeur qui, pour chaque mise à jour bimensuelle (version a et b), en fournit de nouvelles. Ce qui permet d'avoir un catalogue important de fonctions mathématiques préprogrammées, indispensables à nos analyses.

Dans cette étude, les différents programmes Matlab qui effectuent les analyses spectrales basées sur la méthode des FFT (voir paragraphes 6.3.2 et 6.4.1) ont été codés par le Dr François Schmitt. Et les programmes qui utilisent la méthode EMD (cf. paragraphes 6.2, 6.3.3 et 6.4.2) ont été modifiés par le Dr Yongxiang Yuang, à partir des codes de Patrick Flandrin (Flandrin et al., 2004) et de Chen et Huang pour la méthode TDIC (Chen et al., 2010). Dans tous les cas, ces programmes Matlab ont été remodifiés pour s'adapter au mieux à nos jeux de données issues des multiples systèmes automatisés (voir paragraphe 3). Toutes les analyses réalisées dans cette étude ont été effectuées avec le logiciel Matlab, ainsi que les graphiques qui en résultent, hormis les cartes pour la localisation des différents dispositifs.

Chapitre 2. Analyses de la dynamique de la fluorescence

1 Introduction

En géosciences, la majorité des domaines et des processus possèdent des fluctuations stochastiques qui varient très fortement sur une large gamme d'échelles spatiales et temporelles. Ces fluctuations sont généralement la résultante de la superposition de variations déterministiques associées au forçage astronomique comme les cycles annuels, saisonniers, journaliers, ou liés à la marée. Dans ce chapitre nous allons nous concentrer sur l'étude de l'abondance phytoplanctonique par l'intermédiaire de son proxy, la fluorescence. Ce paramètre biogéochimique joue un rôle clé dans les écosystèmes marins, mais l'étude de sa dynamique est relativement complexe : d'un côté il est soumis à des variations stochastiques importantes en relation avec la turbulence, la dynamique des populations, la lumière, les sels nutritifs, le broutage par le zooplancton ; et de l'autre, il est lié à des variations saisonnières déterministiques sous la forme de forçage. En effet, la croissance du phytoplancton est influencée par la disponibilité en sels nutritifs dans le milieu, la température, et la lumière reçue. Dans tous les cas, ces domaines ont des cycles annuels très marqués. La grande majorité de cette étude a été réalisée avec les données provenant du système automatisé MAREL Carnot (voir paragraphe 3.1.1 , chapitre 1), qui est localisé en Manche orientale. Dans cette zone, *Phaeocystis* est la principale espèce phytoplanctonique responsable des blooms (Schapira et al., 2008, Monchy et al., 2012). Il a aussi été montré que cette espèce avait un impact important sur les écosystèmes marins côtiers (Dauvin, 2008, Seuront and Vincent, 2008, Spilmont et al., 2009b, Grattepanche et al., 2010). Plusieurs méthodes ont été utilisées pour surveiller l'abondance de *Phaeocystis* dans cette région, y compris les échantillonnages *in situ* (Grattepanche et al., 2010, Lefebvre et al., 2011, Houliez et al., 2013), les relevés satellites couleurs de l'océan (Lubac et al., 2008), et les systèmes automatisés à hautes fréquences (Zongo and Schmitt, 2011a).

Les systèmes automatisés à point fixe enregistrent simultanément plusieurs paramètres biogéochimiques. Ce chapitre est focalisé sur l'étude de la biomasse phytoplanctonique par l'intermédiaire de son proxy, la fluorescence. D'autres paramètres liés à la fluorescence sont indispensables à son étude : la température de l'eau, la concentration en sels nutritifs et la lumière. L'objectif principal de ce chapitre est d'avoir une meilleure compréhension de la dynamique de la fluorescence lors des épisodes de blooms. Pour cela nous utiliserons les distributions de probabilité, les distributions en temps-fréquence et l'impact des autres paramètres. Bien que dans ce chapitre les analyses soient concentrées sur les données provenant du système MAREL Carnot, les dynamiques d'abondance seront aussi comparées à celles provenant de deux autres systèmes automatisés en Manche, la station I4 (voir paragraphe 3.3 , chapitre 1) et la bouée MAREL Iroise (voir paragraphe 3.1.2 , chapitre 1). Les profils de températures issues des échantillonnages SOMLIT sur la radiale de Boulogne-sur-Mer (voir paragraphe 2.1 , chapitre 1) seront aussi mis à contribution.

2 Présentation des données et analyses préliminaires

2.1 Présentation des données et climatologie

La figure 2-1 montre les données brutes de fluorescence et de température relevées par le système MAREL Carnot entre 2004 et 2011. Elle illustre parfaitement le comportement stochastique de ces deux paramètres ainsi que les variations à multi-échelle. Théoriquement, MAREL Carnot effectue un relevé toutes les vingt minutes. Dans un cas parfait, une année d'enregistrement comporterait donc 26280 points de mesure. En fait, ce type de système ayant des pannes, et devant aussi être interrompu pour des maintenance, le taux d'acquisition pour la fluorescence est de 80% entre 2004 et 2011, avec un total de 168948 points. En ce qui concerne la température, on peut voir clairement sur la figure 2-1 qu'il y a un problème avec l'année 2011 qui semble visuellement avoir une discontinuité non réaliste. Afin d'éviter de biaiser nos

résultats, les analyses menées dans ce chapitre ne prennent pas en compte cette année, ce qui donne un taux d'acquisition de 88% pour la température entre 2004 et 2010, avec un total de 138574 points dans notre base de données.

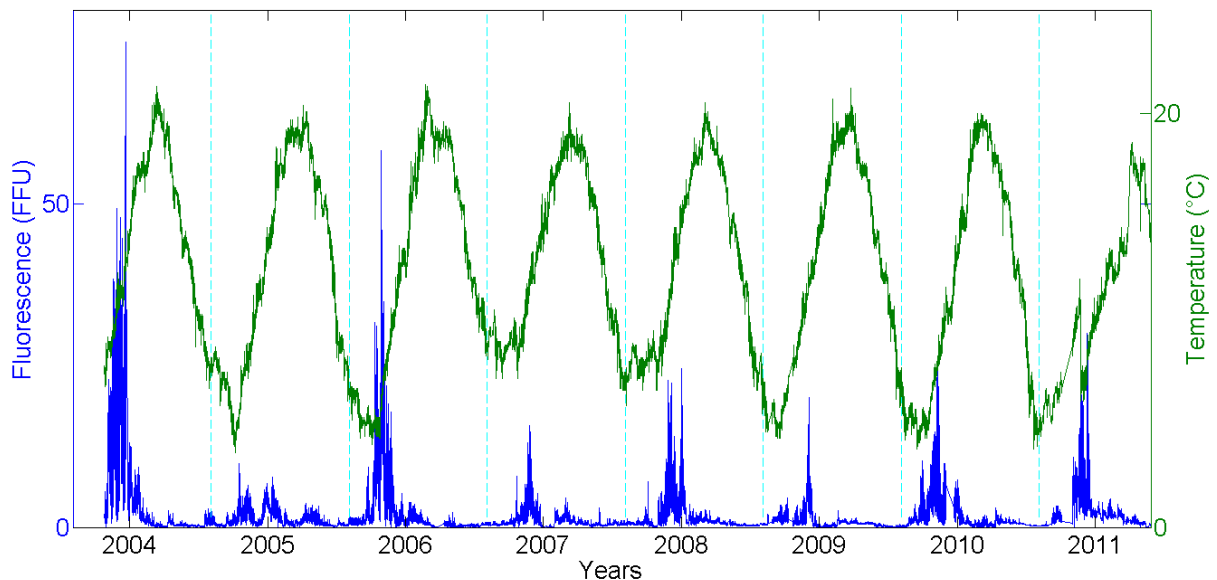


Figure 2-1. Données brutes MAREL Carnot entre 2004 et 2011 pour la fluorescence (en bleu) et la température (en vert). Les lignes pointillées verticales (en cyan) séparent chaque année.

La figure 2-2 représente la climatologie de la température et de la fluorescence. Pour réaliser cette moyenne des variations interannuelles, une moyenne journalière est tout d'abord réalisée sur les données brutes, c'est-à-dire que nous n'avons plus que 365 points par année, au lieu des 26280 théoriques, chaque jour est donc une moyenne de 576 points (72x8). Puis on moyenne ces années entre elles pour obtenir la climatologie présentée en figure 2-2, ce qui nous permet de mieux comprendre les variations de ces deux paramètres sur une saison. La climatologie des températures de l'eau de mer varie entre 6-7°C en hiver et entre 18-19°C en été, avec le maximum des températures qui est compris entre le 30 juillet et le 20 septembre. Les données de

fluorescence comportent des fluctuations beaucoup plus importantes que la température et par conséquent, leur courbe moyenne est beaucoup moins lisse; cependant, on voit très clairement apparaître la dynamique saisonnière, avec un bloom moyen qui est compris entre le jour 70 (10 Mars) et le jour 150 (1^{er} Juin), un peu avant que le plateau qui comporte les températures maximales ne fasse son apparition.

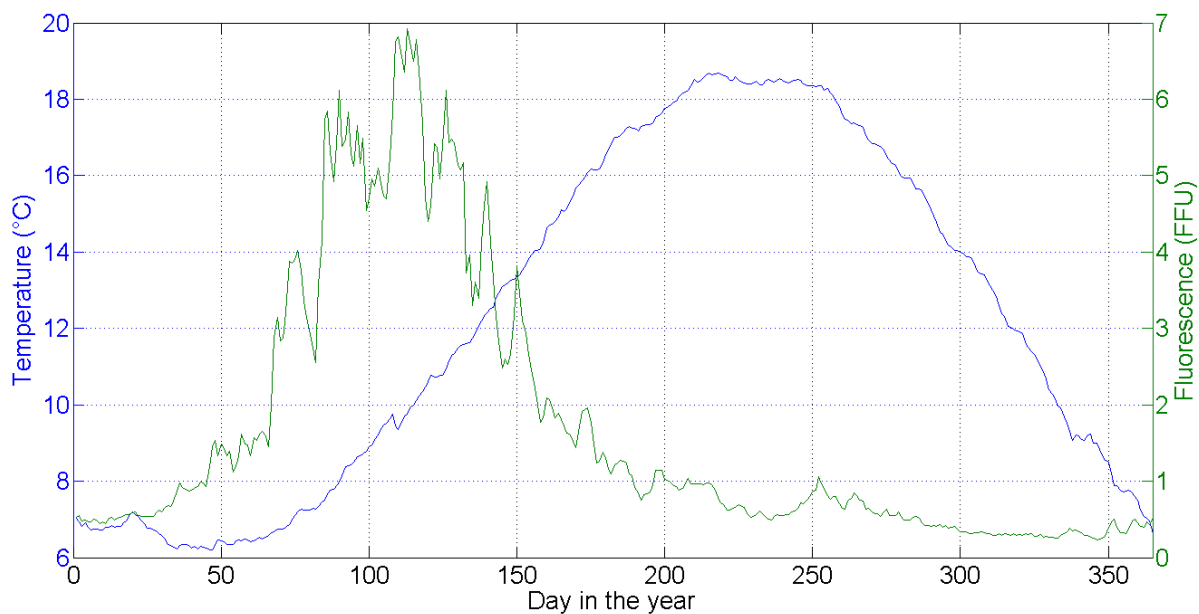


Figure 2-2. Climatologie calculée à partir des moyennes interannuelles journalières MAREL Carnot. Pour la température en bleue entre 2004 et 2010, et la fluorescence en vert entre 2004 et 2011.

2.2 Extrêmes et temps de retour

Dans cette section nous considérons les valeurs extrêmes, afin d'avoir une idée préliminaire sur la dynamique de la fluorescence et de la température. Pour cela nous utiliserons la méthode des quantiles, qui se base sur la fonction de distribution t qui est définie comme suit :

$$F(x) = \Pr(X \leq x) = \int_{-\infty}^x p(t)dt \quad (27)$$

où $p(t)$ est la densité de probabilité, X correspond aux données étudiées et x est un seuil donné. Le quantile 10 qui est utilisé pour les valeurs extrêmes faibles est noté x_{10} et le quantile 90 qui est utilisé pour les valeurs extrêmes fortes est noté tel que :

$$\begin{aligned} F(x_{10}) &= 0,1 \\ F(x_{90}) &= 0,9 \end{aligned} \quad (28)$$

Les quantiles x_{10} et x_{90} sont alors estimées en inversant la fonction $F(x)$:

$$\begin{aligned} x_{10} &= F^{-1}(0,1) \\ x_{90} &= F^{-1}(0,9) \end{aligned} \quad (29)$$

2.2.1 Extrêmes des températures

Nous avons calculé, sur la période de 2004 à 2010, les quantiles 10 et 90 de la température : $T_{10} = 6,3^{\circ}\text{C}$ et $T_{90} = 18,8^{\circ}\text{C}$. La figure 2-3 présente la fonction de distribution cumulative de ces températures.

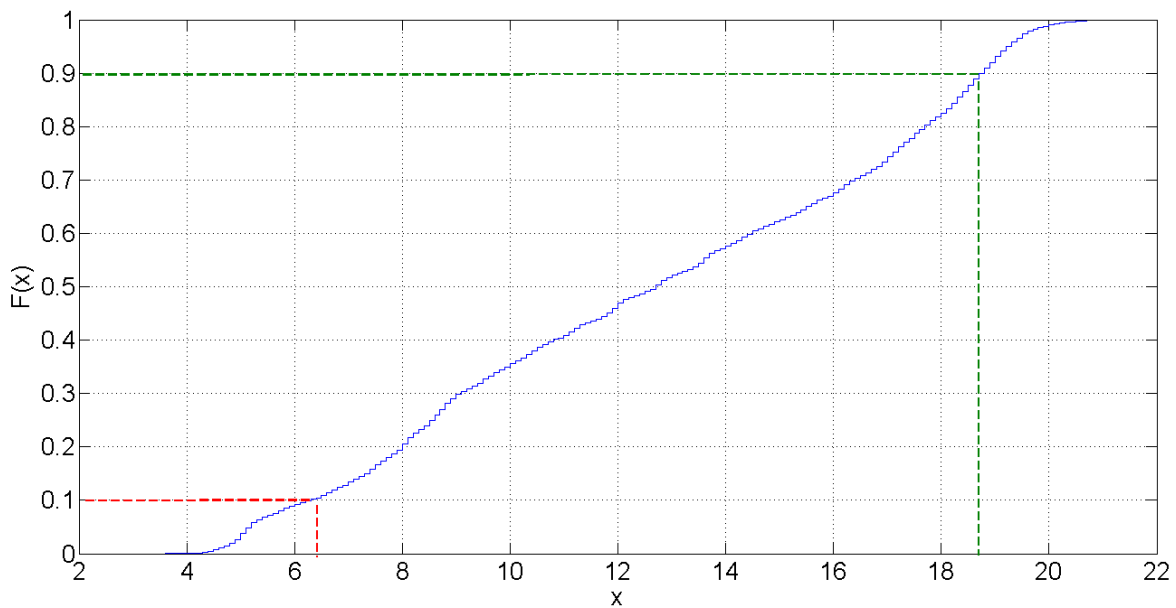


Figure 2-3. Fonction de distribution cumulative de température entre 2004 et 2010. En rouge le quantile 10 et en vert le quantile 90.

La figure 2-4 représente les données brutes de températures issues du système automatisé MAREL Carnot, année par année entre 2004 et 2011 (courbes bleues). Les lignes horizontales rouges correspondent au quantile 10, et les lignes horizontales vertes correspondent au quantile 90. Il est important de noter que dans les deux cas pour le quantile 10 et 90, les calculs sont effectués à partir des données brutes MAREL Carnot de température entre 2004 et 2010, car, comme nous l'avons déjà fait remarquer (voir paragraphe 2.1, chapitre 2), l'année 2011 est trop bruitée. Cette année apparaît donc juste à titre indicatif, en ce qui concerne le paramètre de température. Mais nous verrons dans le prochain paragraphe que cette année sera considérée pour la fluorescence.

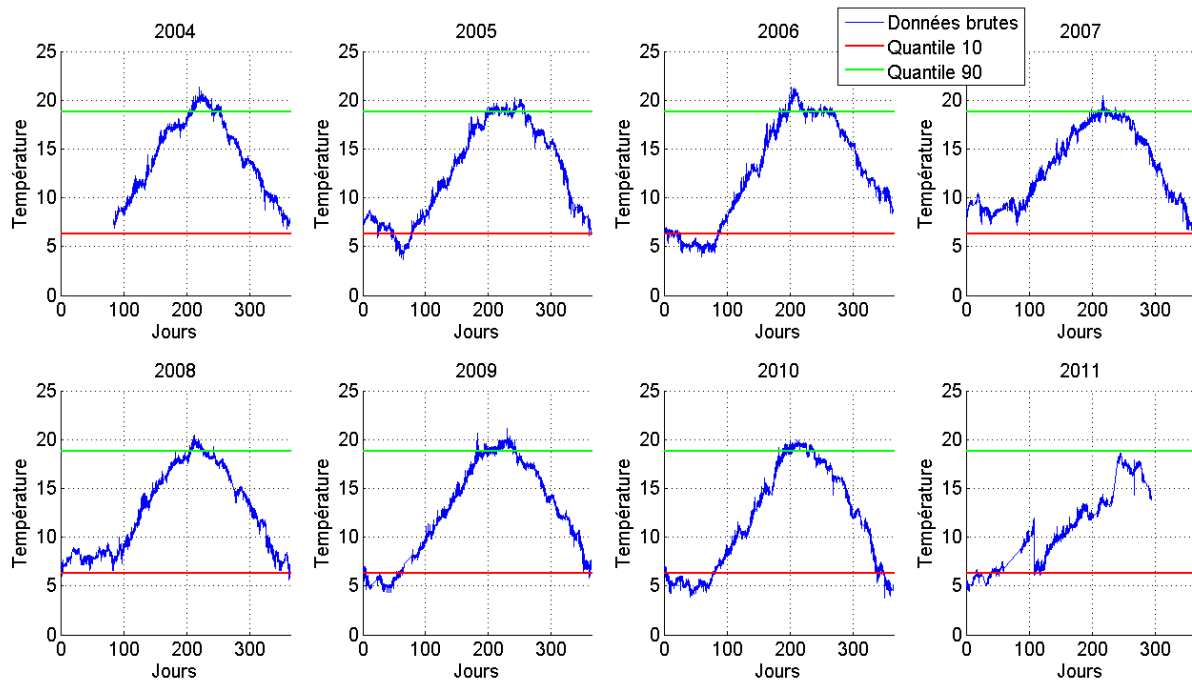


Figure 2-4. Données brutes de température MAREL Carnot en fonction des quantiles 10 et 90 ($T_{10} = 6,3^{\circ}\text{C}$; $T_{90} = 18,8^{\circ}\text{C}$). Les courbes bleues représentent les données brutes de température. Les lignes horizontales vertes montrent le quantile 10 et les lignes horizontales rouges le quantile 90.

On peut voir très clairement sur cette figure 2-4 qu'il existe un pattern plutôt stable, qui semble se reproduire d'une année sur l'autre pour les données brutes de température MAREL Carnot. Ce qui dénote une certaine stabilité au niveau de la dynamique interannuelle de ce paramètre. On remarque aussi que pour l'année 2007 il n'y pas de valeur en dessous de la limite du quantile 10 et on retrouve le même phénomène en 2008, où il y a très peu de valeurs qui franchissent cette limite. Ces années ont donc une tendance à ne pas atteindre des valeurs extrêmes froides. Il en va de même en 2004, mais la station MAREL Carnot a été mise en service en Mars 2004, donc nous ne disposons pas des données de température sur le début de cette année; or quand on regarde les autres années, on voit que c'est précisément durant cette période que les températures les plus froides sont généralement atteintes, il est donc

difficile de tirer des conclusions en ce qui concerne le quantile 10 pour cette année. En ce qui concerne le quantile 90, on voit que toutes les années ont des valeurs qui dépassent cette limite, il y a donc une tendance généralisée à atteindre des valeurs extrêmes chaudes, mais nous allons voir cela plus en détail par l'intermédiaire de la figure 2-5.

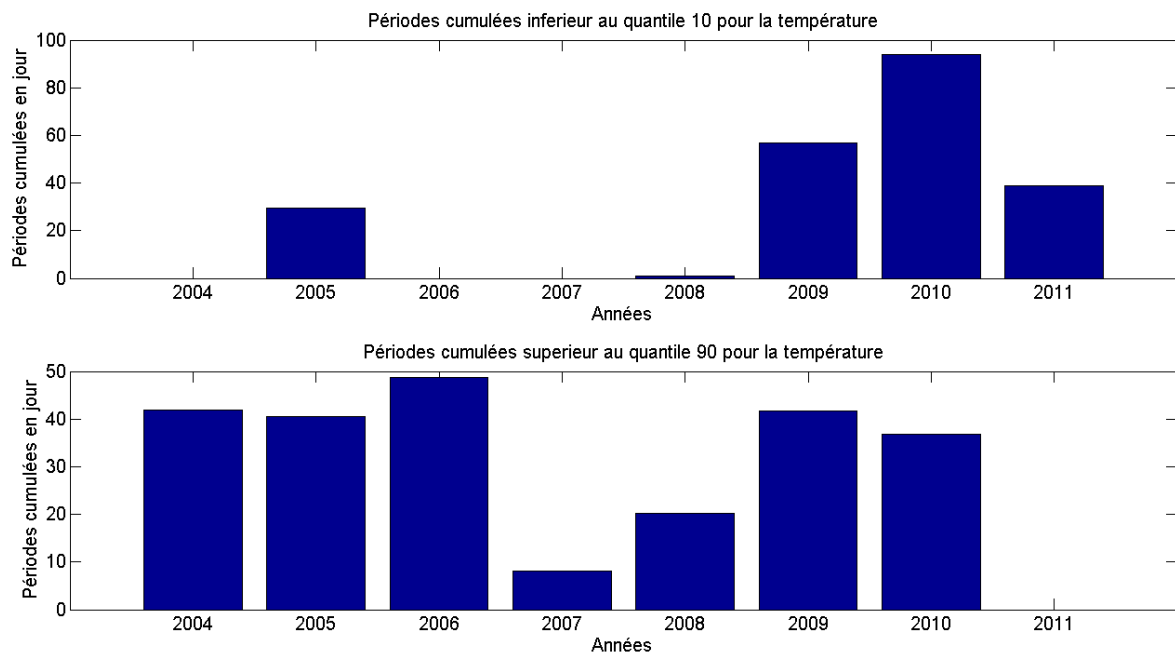


Figure 2-5. Périodes cumulatives (en jour) des données brutes de température MAREL Carnot entre 2004 et 2011 en dessous du quantile 10 (figure en haut) et au-dessus du quantile 90 (figure en bas).

La figure 2-5 représente les périodes cumulatives en jours des données brutes de température MAREL Carnot en dessous du quantile 10 et au-dessus du quantile 90. L'histogramme en haut de la figure 2-5 montre ces périodes cumulées en dessous du quantile 10 et l'on voit très clairement que la distribution des valeurs extrêmes froides n'est pas homogène entre les années. Pour les années 2004, 2006, 2007 et 2008, les périodes cumulées inférieures au quantile 10 sont négligeables. Quant aux autres

années, il y a une gradation dans l'augmentation des ces périodes cumulées : en 2005 on est proche de 30 jours, en 2009 cette période a quasiment doublé (≈ 60 jours) et on atteint un maximum en 2010 avec environ 90 jours. Ces trois années comportent donc à elles seules la quasi-totalité des périodes cumulées en dessous du quantile 10, avec l'année 2010 qui a une période particulièrement importante ; cette dernière est pratiquement égale à la somme de 2005 et 2009. Ceci semble indiquer que ces dernières années, les hivers ont été plus froids.

En ce qui concerne les périodes cumulées supérieures au quantile 90, elles sont toutes très proches de 40 jours (avec 2006 qui est légèrement plus importante), mises à part les années 2007 et 2008 où ces périodes sont respectivement d'environ 10 et 20 jours. Il ne semble pas y avoir de lien direct entre les patterns interannuels des périodes inférieures au quantile 10 et supérieures au quantile 90 ; par exemple pour les années 2007 et 2008, les périodes cumulées sont faibles dans le cas des quantiles 10 et 90, mais on ne retrouve pas le même phénomène en 2006, où la période est faible en dessous du quantile 10 et très importante au-dessus du quantile 90. Globalement, ceci semble indiquer qu'il n'y a pas d'augmentation de la température en été.

2.2.2 Extrêmes de la fluorescence

Nous nous intéressons ici aux quantiles 10 et 90 estimés pour les données de fluorescence entre 2004 et 2011 : $F_{10} = 0,19\text{FFU}$ et $F_{90} = 3,97\text{FFU}$. La figure 2-6 présente la fonction de distribution cumulative de cette fluorescence.

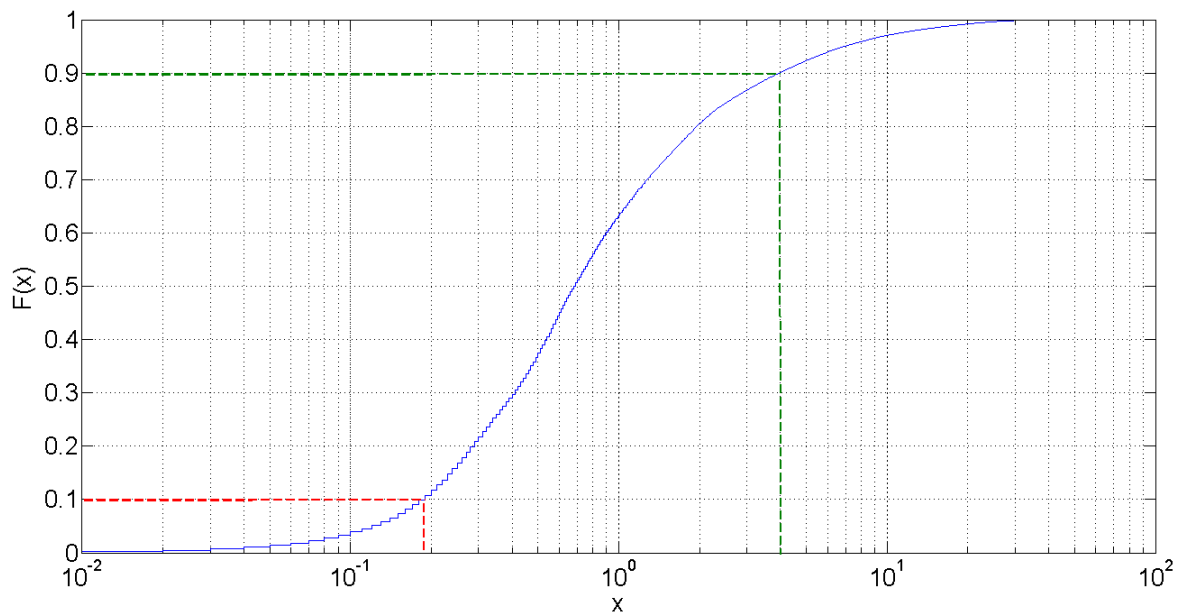


Figure 2-6. Fonction de distribution cumulative de fluorescence entre 2004 et 2011. En rouge le quantile 10 et en vert le quantile 90.

La figure 2-7 utilise le même protocole que celui présenté pour la figure 2-4, excepté que dans le cas présent, nous utilisons les données de fluorescence provenant de la balise MAREL Carnot et que l'année 2011 est prise en compte pour les calculs de quantiles. Le code couleur a également été préservé, c'est-à-dire que les lignes horizontales rouges symbolisent la limite du quantile 10, les lignes horizontales vertes la limite du quantile 90 et la courbe bleue représente les données brutes de fluorescence. Contrairement à la température, les patterns de fluorescence sont très variables en intensité d'une année à l'autre ; comportent des fluctuations annuelles beaucoup plus importantes ; et les limites composées par les quantiles 10 et 90 sont atteintes pour chaque année. Les valeurs extrêmes au-dessus du quantile 90 de fluorescence semble beaucoup plus marquées en 2004 et 2006 que pour les autres années présentées dans cette figure 2-7. Nous verrons si cette tendance se confirme avec l'histogramme des périodes cumulées présenté en figure 2-8.

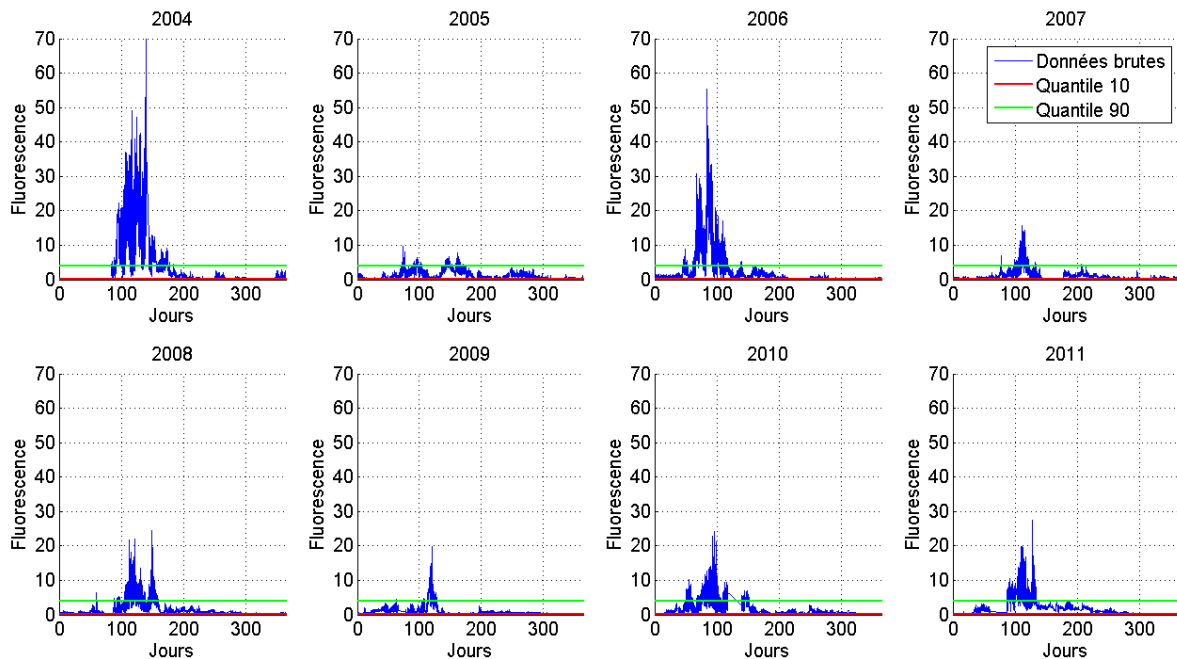


Figure 2-7. Données brutes de fluorescence MAREL Carnot en fonction des quantiles 10 et 90 ($F_{10} = 0,19\text{FFU}$; $F_{90} = 3,97\text{FFU}$). Les courbes bleues représentent les données brutes de température. Les lignes horizontales vertes montrent le quantile 10 et les lignes horizontales rouges le quantile 10. La ligne pour F_{10} est très proche des abscisses.

La figure 2-8 représente les périodes cumulatives en jour des données brutes de fluorescence MAREL Carnot en dessous du quantile 10 et au-dessus du quantile 90, de la même manière que ce qui est présenté en figure 2-4 pour les températures. Comme pour les températures, il y a une grande variabilité interannuelle entre les périodes cumulatives en dessous du quantile 10, mais dans le cas présent, on peut voir se dessiner un pattern : une décroissance apparaît dans les périodes comprises entre 2006 et 2008 et le même phénomène se reproduit entre 2009 et 2011. Il serait intéressant d'avoir plus d'années à disposition, afin de voir si ce pattern est reproductible dans le temps ; on constate bien une diminution entre 2004 et 2005,

mais malheureusement nous n'avons pas les données de 2003, qui pourraient confirmer ou infirmer cette hypothèse.

On retrouve aussi une grande variabilité interannuelle pour les périodes cumulatives supérieures au quantile 90. On peut voir un autre pattern se dessiner avec une alternance de période de durée importante et faible : en 2004, on est proche de 70 jours, puis en 2005 de 20 jours, en 2006 de 60 jours, ... L'année 2011 semble être aussi dans le même rythme, mais avec une décroissance moins importante. Bien que les périodes liées au quantile 10 et 90 possèdent toutes les deux un pattern, il ne semble pas y avoir d'interaction commune ; dans le premier cas, nous avons un cycle possible de trois ans et dans le deuxième, une alternance d'intensité annuelle.

Pour résumer, il y a une grande variabilité interannuelle dans tous les extrêmes de température et de fluorescence, cependant on peut distinguer deux patterns dans les extrêmes de fluorescence, contrairement aux extrêmes de température qui semblent avoir un comportement plus stochastique. Dans tous les cas, il ne semble pas y avoir une dynamique globale claire à la hausse ou à la baisse concernant la "durée" des blooms, le mot durée consistant ici à compter les périodes cumulées supérieures au quantile 90.

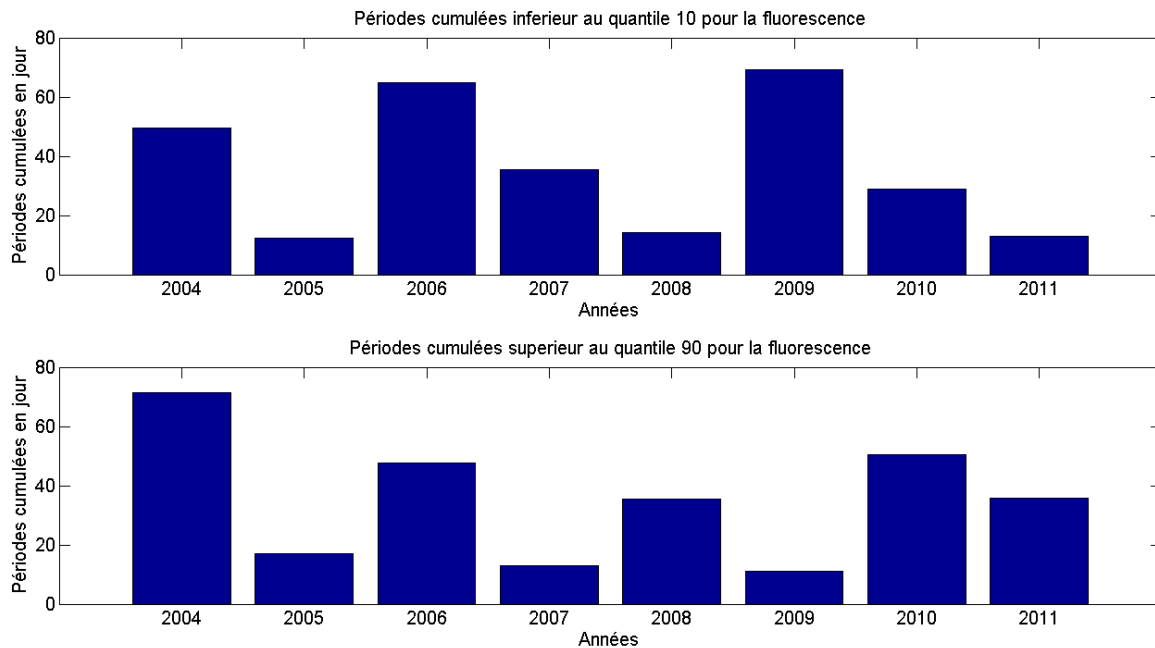


Figure 2-8. Périodes cumulatives en jour des données brutes de fluorescence MAREL Carnot entre 2004 et 2011 en dessous du quantile 10 (figure en haut) et au-dessus du quantile 90 (figure en bas).

2.2.3 temps de retour

Le calcul des temps de retour est une méthode souvent utilisée dans le domaine des géosciences, dans le but de caractériser la périodicité moyenne entre deux événements extrêmes sur une période de temps donnée généralement assez long. Cette méthode est appliquée pour les tremblements de terre (Iervolino et al., 2011), les périodes de crues (Pall et al., 2011), les pluies (Kharin et al., 2013, Schmitt and Nicolis, 2002), ... En d'autre terme, le temps de retour va définir un temps statistique entre 2 occurrences d'un événement d'intensité similaire, avec I l'intervalle entre ces deux événements qui peut être défini comme suit :

$$I = \frac{n}{m} \quad (30)$$

où n est le nombre d'années prises en compte et m est le nombre d'occurrences enregistrées de l'événement étudié. La figure 2-9 présente les temps de retour en fonction d'un seuil de fluorescence donné. Les temps de retour sont exprimés en jour sur une échelle logarithmique. On voit se dessiner une tendance générale sur cette figure : plus la valeur seuil augmente, plus le temps de retour augmente. Mais l'on peut voir une rupture de pente aux alentours de la valeur seuil de 30, et à partir de la valeur seuil de 48, on atteint un plateau avant une brusque chute du temps de retour après le seuil 58. Ces dates correspondent aux fluctuations assez fortes, visibles sur les graphiques, pendant les blooms. Ces fluctuations font que le temps de retour moyen entre deux pics décroît. Ainsi, on pourrait considérer que la valeur $F_0=29$ observée pour ce décrochage serait une valeur admissible d'un "seuil de bloom".

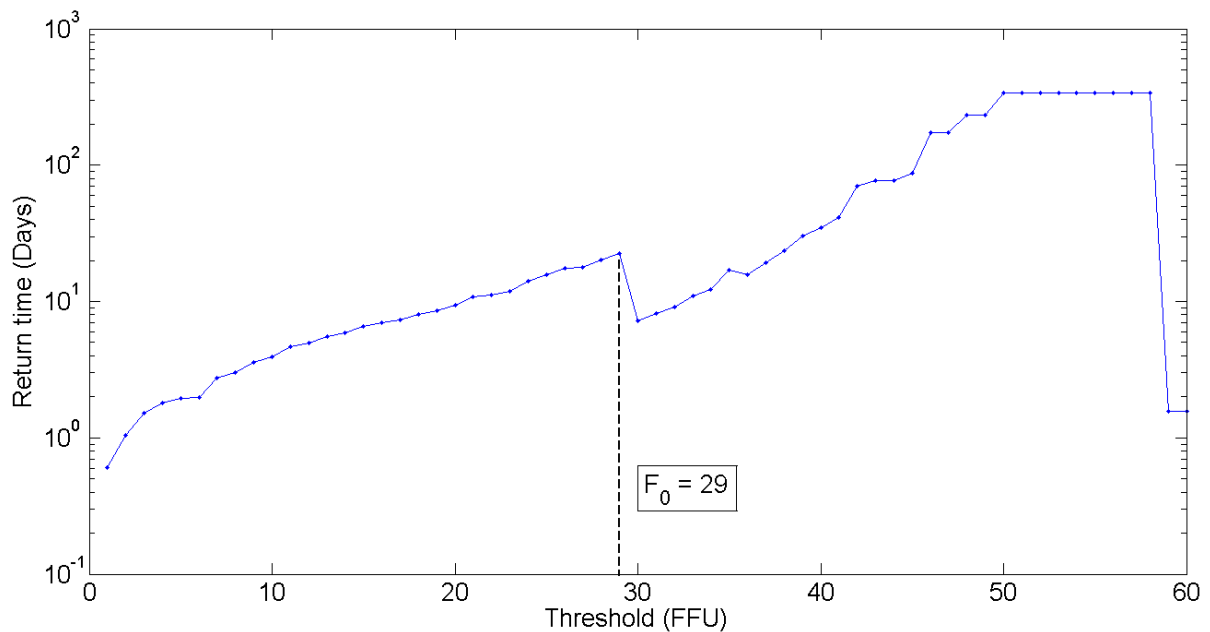


Figure 2-9. Temps de retour de la fluorescence MAREL Carnot. L'axe des y est en échelle log et les temps de retour sont en jour.

3 Analyses multi-variées

La figure 2-1 présentée dans le précédent paragraphe montre que l'intensité du bloom possède une forte variabilité à différentes échelles de temps. Si le mécanisme des blooms est partiellement compris — il a besoin de sels nutritifs, de l'augmentation des températures printanières, et d'un bon niveau de turbulence (Steele and Gifford, 2010) — le mécanisme précis n'est pas encore compris et la raison des blooms de forte ou faible intensité est toujours inconnue. Dans cette étude, nous essayons de trouver des relations statistiques, afin de comprendre ce déterminisme. Nous considérons les données de fluorescence année par année, et étudions les différentes covariations qu'il existe entre les quantités mesurées.

3.1 Analyse en composante principale (ACP)

Afin d'estimer globalement quelle quantité a le plus d'influence sur la dynamique de fluorescence, nous avons réalisé une analyse en composante principale (ACP). L'ACP est une approche à la fois géométrique et statistique qui permet de voir les corrélations (et décorrélations) présentes au sein d'un jeu de données multi-varié. Les variables utilisées dans cette analyse sont la fluorescence, la température, le P.A.R, les silicates, les phosphates et les nitrates. La base de données multiparamétrique utilisée pour une ACP doit être complète, or dans le tableau 1-6 (voir chapitre 1) on avait vu que les séries temporelles de P.A.R et de sels nutritifs comportaient beaucoup de valeurs manquantes. Dans ce cadre-là, on a dégradé les séries temporelles utilisées en entrée de l'ACP à une échelle mensuelle, c'est-à-dire qu'une année pour un paramètre est constituée de 12 points (1 par mois) et chacun de ces points est la résultante d'une moyenne mensuelle.

La figure 2-10 montre une ACP en trois dimensions, ainsi que ses trois composantes principales. Dans tous les cas, la température et la fluorescence sont toujours proches. Ce qui signifie qu'il y a probablement une relation forte entre ces

deux paramètres. La lumière disponible (P.A.R) arrive en deuxième position et semble aussi avoir une influence sur la fluorescence. En ce qui concerne les sels nutritifs, les silicates et les nitrates semblent avoir une influence faible sur la fluorescence, cependant les phosphates sont assez proches de la fluorescence, en particulier quand nous considérons la composante 3 et 1.

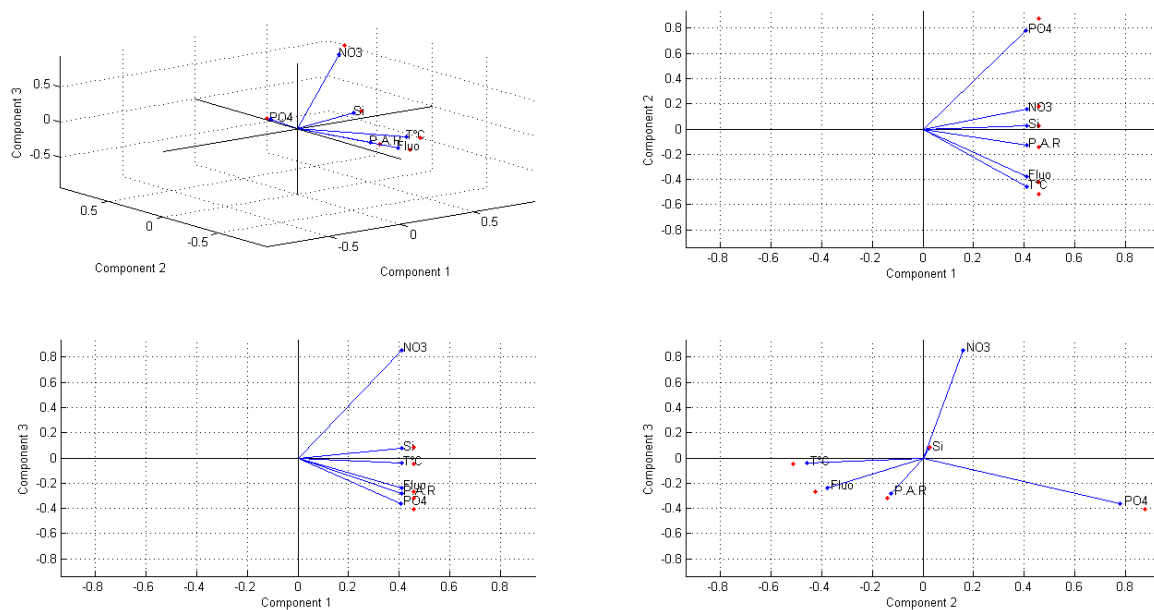


Figure 2-10. Analyse en composante principale (ACP) en trois dimensions, avec les jeux de données MAREL Carnot pour la fluorescence, la température, le P.A.R, les silicates, les phosphates et les nitrates. En haut à gauche : vue en perspective, composantes 1, 2 et 3 ; à droite composantes 1 et 2. En bas à gauche : composantes 1 et 3 et à droite, composante 2 et 3.

3.2 Relation avec la fluorescence

En suivant les indications de l'ACP, nous avons d'abord considéré la possible influence de la température sur l'intensité du bloom. Une étude antérieure réalisée dans la même zone géographique, c'est-à-dire en Manche orientale propose

l'hypothèse selon laquelle plus les températures hivernales seraient froides, plus le bloom printanier suivant aurait une forte intensité (Gómez and Souissi, 2008). On peut résumer l'explication de ce phénomène fourni par ces deux auteurs de la manière suivante : lorsque les températures hivernales sont froides, la stratification des eaux de surface augmenterait, ce qui aurait pour effet d'augmenter la concentration en sels nutritifs et la turbidité dans la couche de surface ; l'augmentation de la turbidité entraînerait une diminution de la lumière dans cette couche, ce qui défavoriserait la prolifération de *Phaeocystis*, ce qui par conséquent laisserait le champ libre aux diatomées et avec les fortes concentrations en sel nutritifs, ce dernier taxon serait favorisé. Dans le but de vérifier cette hypothèse avec les jeux de données hautes fréquences MAREL Carnot, nous avons tracé la figure 2-11, dans laquelle on retrouve les moyennes annuelles de fluorescence (qui sont dominées par le bloom) en fonction des moyennes de températures hivernales avant ces blooms. Il y a une forte variabilité et seulement 8 points, mais il y a aussi une tendance visible qui se dessine, où les basses températures hivernales pré-bloom sont associées aux blooms de faible intensité. Par conséquent, nous trouvons la relation inverse de l'hypothèse qui avait été proposée précédemment (Gómez and Souissi, 2008).

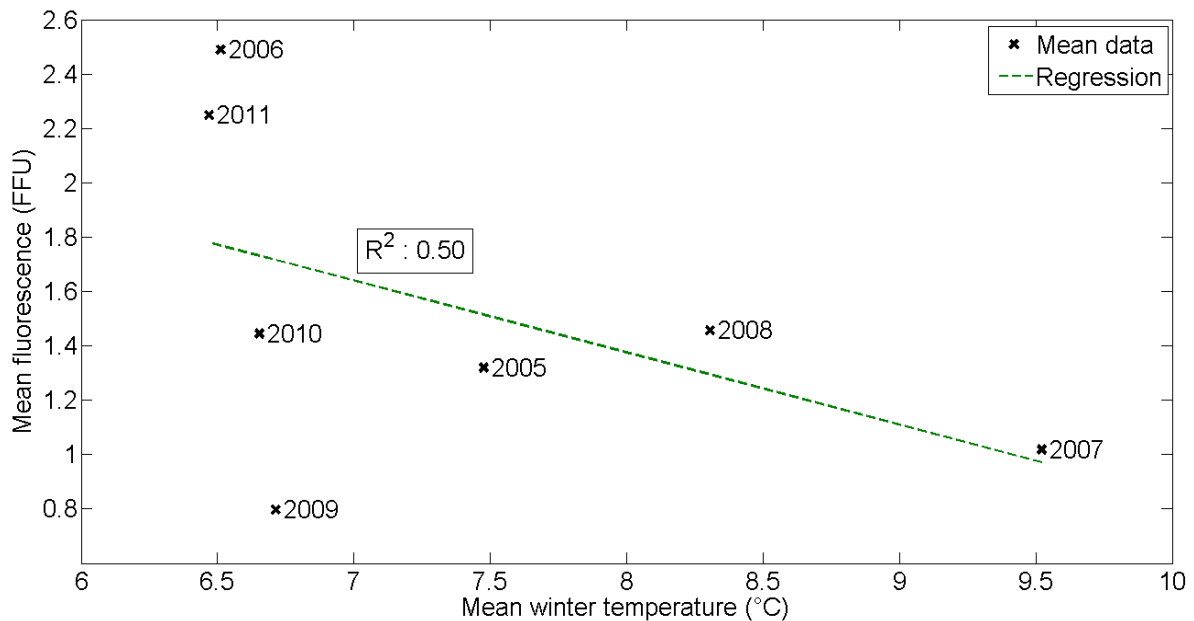


Figure 2-11. Moyenne de fluorescence annuelle versus moyenne des températures hivernales pré-bloom.

Les sels nutritifs sont indispensables à la croissance du phytoplancton; la disponibilité de ces sel nutritifs en période printanière est l'une des conditions sine qua non au départ de ce bloom, et nous allons ici vérifier si l'abondance de ces sels nutritifs est directement en relation avec l'intensité des blooms. Les moyennes de fluorescence annuelles sont comparées aux différents sels nutritifs qu'enregistre MAREL Carnot. La figure 2-13 est donc obtenue en fonction des silicates, la figure 2-14 en fonction des phosphates, la figure 2-15 en fonction des nitrates et la figure 2-12 en fonction du P.A.R.. Les moyennes de P.A.R et de sels nutritifs sont directement comparées avec les moyennes de fluorescence de la même année, contrairement à ce qui a été présenté en figure 2-11.

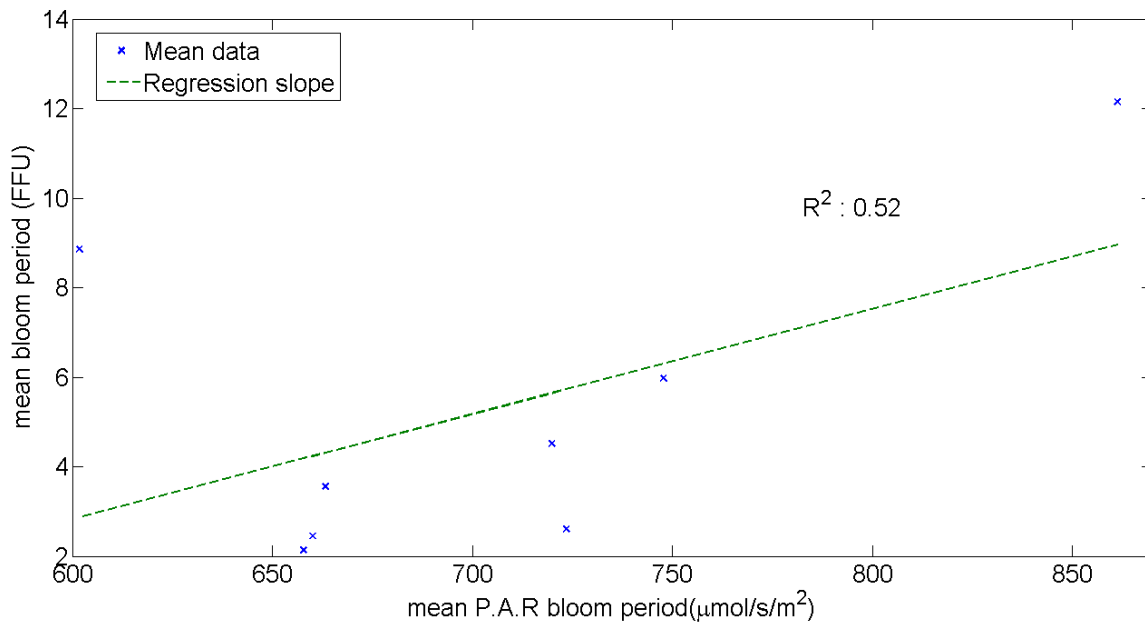


Figure 2-12. Moyenne de fluorescence annuelle versus moyenne P.A.R (sans la nuit), dans les deux cas, les moyennes sont effectuées durant les périodes de blooms.

Pour les données de P.A.R (voir figure 2-12), la moyenne a été calculée avec uniquement les données durant la journée : un seuil a été appliqué pour enlever toutes les mesures enregistrées pendant la nuit. Dans cette figure, nous avons uniquement considéré les périodes de bloom pour le P.A.R comme pour la fluorescence. Les silicates et les phosphates ne semblent pas avoir d'influence directe sur le bloom. En ce qui concerne les phosphates et le P.A.R, nous trouvons un coefficient de corrélation similaire à celui qu'il y a entre les données de température et de fluorescence (voir figure 2-11).

Par conséquent, seuls la température, les phosphates et le P.A.R semblent avoir un impact direct sur la fluorescence; ces résultats sont cohérents avec les observations faites sur la figure 2-10.

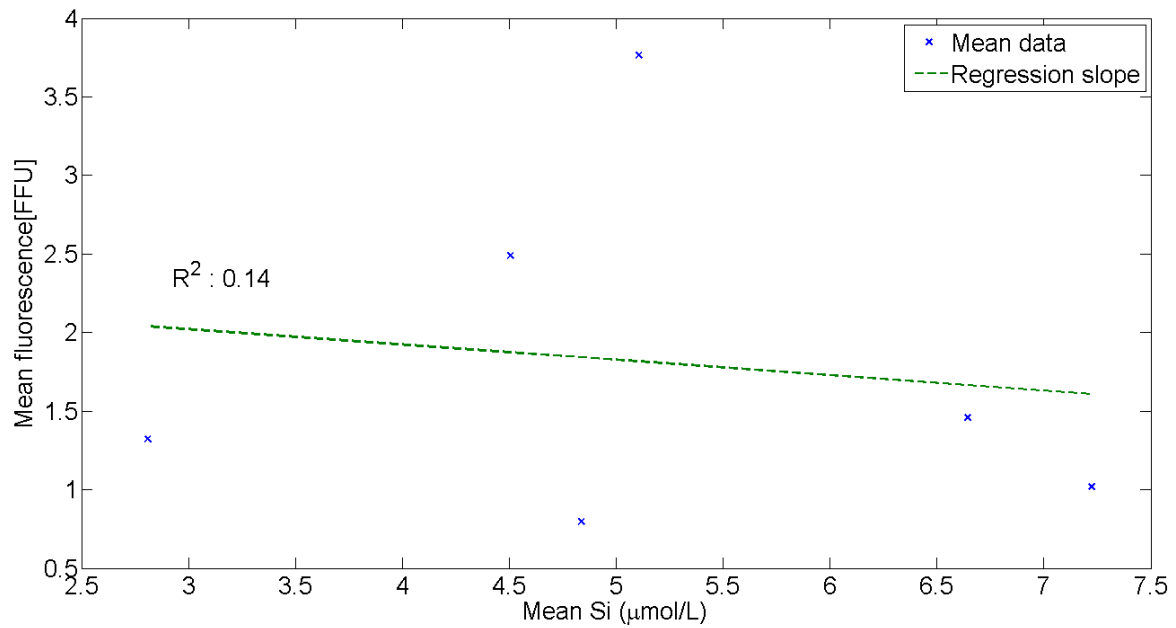


Figure 2-13. Moyennes de fluorescence annuelles versus moyennes annuelles des silicates.

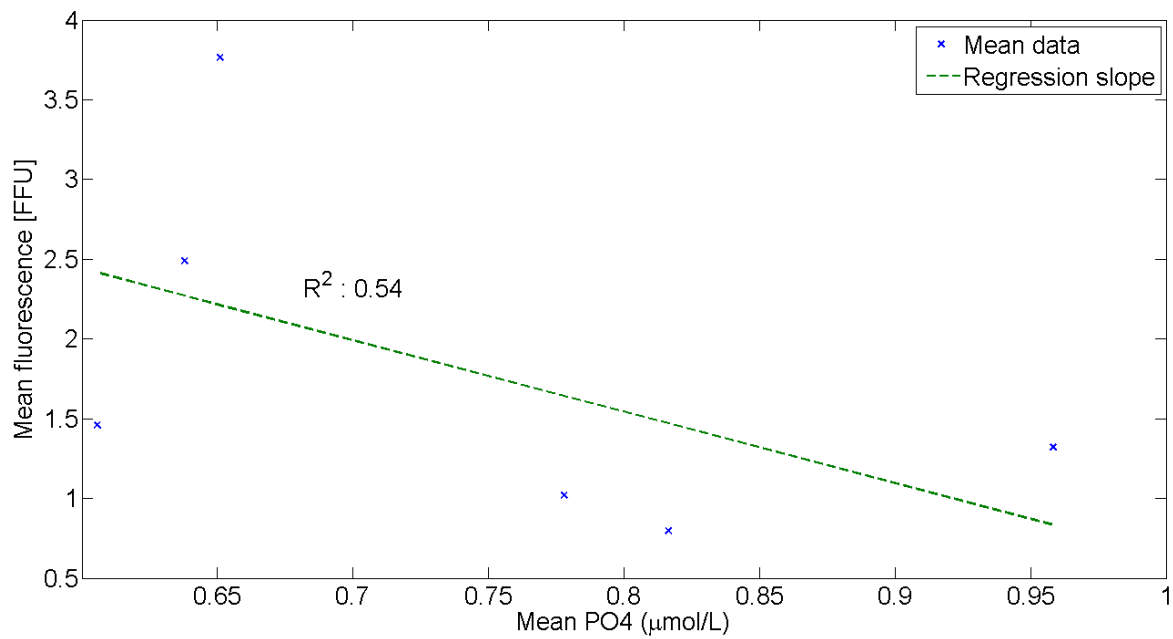


Figure 2-14. Moyennes de fluorescence annuelles versus moyenne annuelle des phosphates.

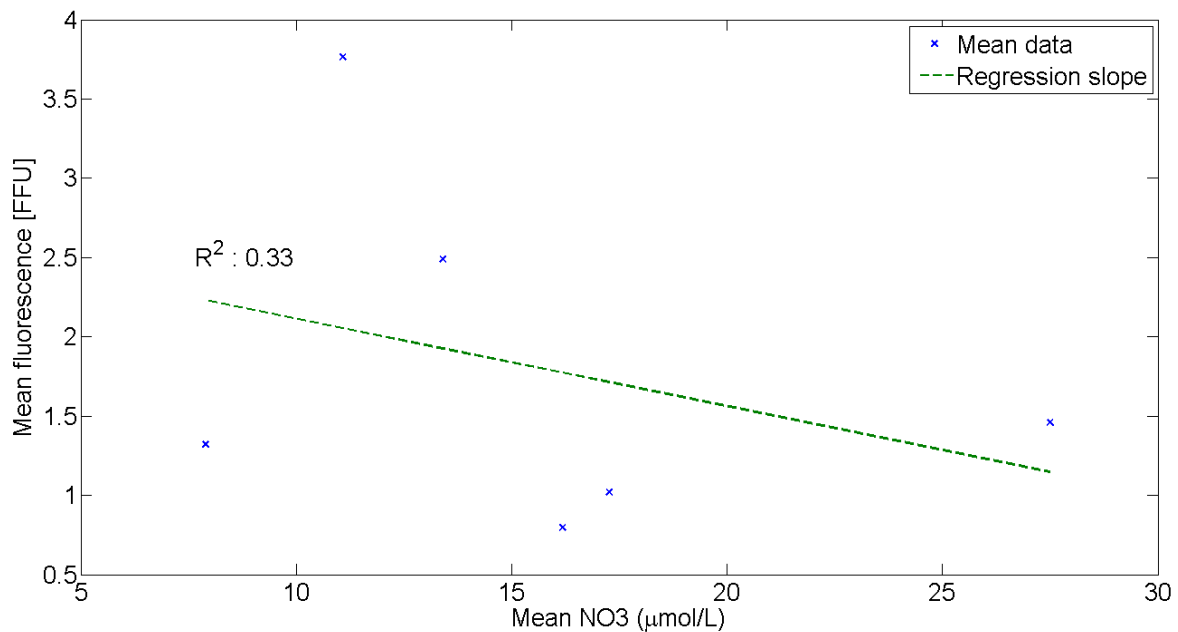


Figure 2-15. Moyennes de fluorescence annuelles versus moyennes annuelles des nitrates.

4 Analyses des distributions de probabilité et de la dynamique via la décomposition modale empirique (EMD)

4.1 Analyse de la distribution de probabilité

4.1.1 Distribution de probabilité des données MAREL Carnot

Les statistiques de fluorescence du bloom sont étudiées par l'intermédiaire de la PDF de l'ensemble du jeu de données MAREL Carnot, qui se compose de 168948 points pour une durée totale de 8 années. La figure 2-16 montre cette PDF en échelle log-log : on voit que les valeurs du proxy de la biomasse phytoplanctonique sont

réparties sur une large gamme. Pour les valeurs comprises 1 et 30, la courbe en échelle log-log est quasiment linéaire. Lorsqu'on effectue un ajustement en loi de puissance (voir équation 3 dans le chapitre 1) sur cette PDF, le coefficient de pente α qui en résulte est égal à 2, seulement les valeurs au-dessus de 30 FFU ne suivent pas cette loi. Nous traçons aussi sur la même figure un ajustement log-normal avec une moyenne et un écart type qui sont calculés à partir du logarithme de données de fluorescence (moyenne du log = -0,27 ; écart type du log = 1,22). L'ajustement log-normal n'est pas mauvais, mais clairement l'ajustement en loi de puissance est plus proche de notre jeu de données.

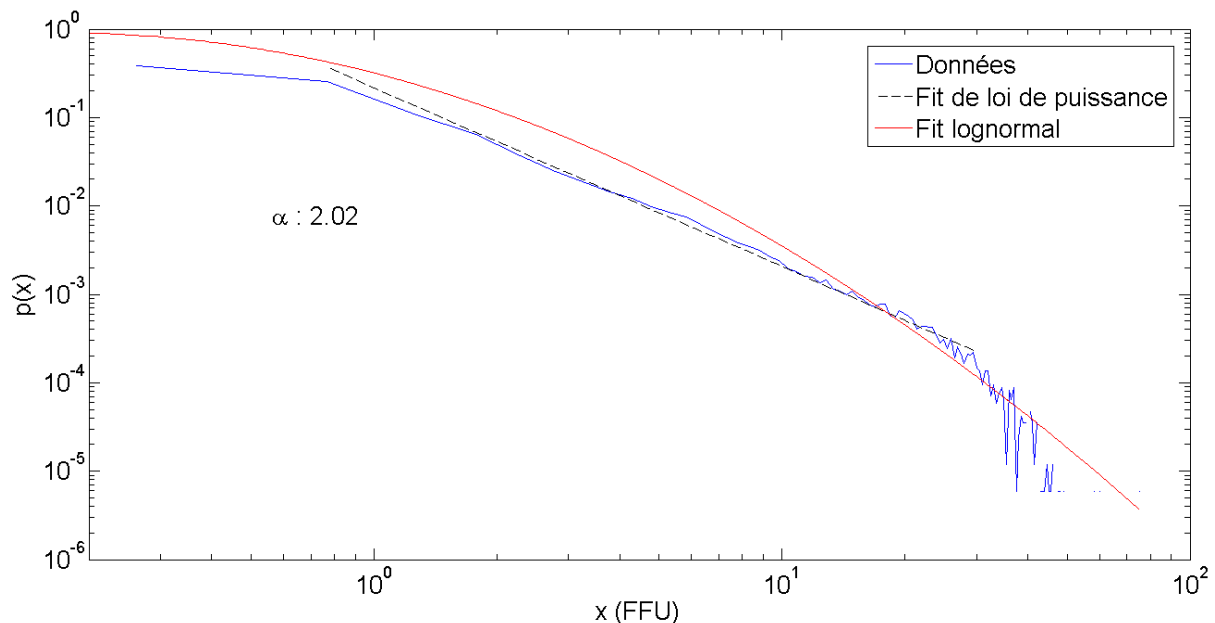


Figure 2-16. Fonction de densité de probabilité en échelle log-log sur les données MAREL Carnot de fluorescence entre 2004 et 2011 (courbe bleue). La courbe rouge représente un ajustement effectué avec la loi log-normale et la droite noire représente un ajustement en loi de puissance.

Nous avons déjà vu dans le chapitre 1 Matériels et Méthode (voir paragraphe 6.3.1) que ce type d'ajustement été utilisé de façon quasi dogmatique dans le domaine

de la biologie pour modéliser les données liées à l'abondance. Nous avons aussi vu que l'utilisation de cette loi impliquait que le logarithme des données d'abondance soient distribuées de manière à suivre une loi normale et que par conséquent, l'abondance devait être log-normale. Il s'agit donc d'un point à considérer de plus près avec un test de lognormalité : la droite en pointillée noire sur la figure 2-17 représente une fonction log-normale et les croix bleues représentent nos données de fluorescence. Si la PDF de nos données était log-normale, on devrait avoir une droite, mais clairement dans notre cas, cela ne se vérifie que pour une petite plage de valeurs (entre 0,06 et 2). Par conséquent, cette hypothèse n'est pas valide, nos données de fluorescence ne sont donc pas log-normales. L'ajustement en loi de puissance est un meilleur modèle pour nos données d'abondance et la pente issue de cette loi est proche de 2 (voir figure 2-16), ce qui montre que notre PDF est proche d'une loi de Cauchy (voir chapitre 1 ; paragraphe 6.3.1 ; équation 16).

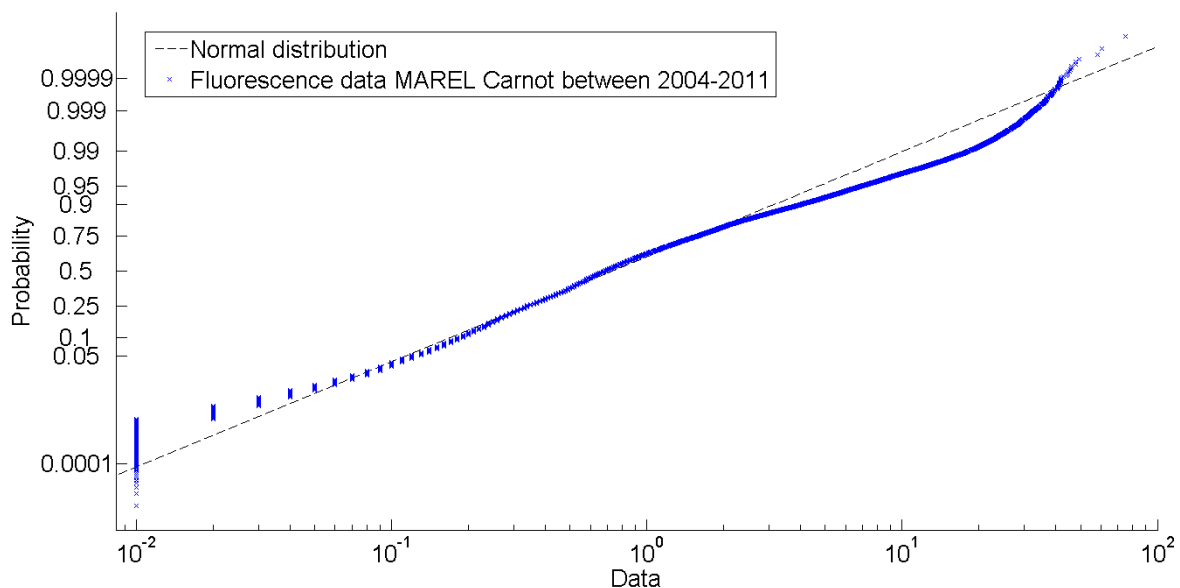


Figure 2-17. Test de la distribution lognormale sur les données de fluorescence MAREL Carnot. La ligne droite en pointillée noire correspond à la distribution lognormale et les croix bleues représentent les données de fluorescence.

La figure 2-18 montre les PDF d'abondance de manière annuelle entre 2004 et 2011. On constate qu'un ajustement en loi de puissance peut être proposé pour chaque année, avec souvent pour les valeurs les plus extrêmes une décroissance plus rapide de type exponentielle. A l'exception de l'année 2005 où cet ajustement n'est pas très bon, la loi de puissance est malgré tout valide sur une gamme de valeurs assez étendues. Nous avons estimé le coefficient de pente pour chacune des années à partir de l'équation (15) présentée dans le chapitre 1. Ce coefficient n'est plus égal à 2, mais il varie entre un minimum de 1,2 pour l'année 2004 et un maximum de 2,3 pour l'année 2009. Cet exposant caractérise une structuration des données : plus la pente est faible, plus les grandes valeurs seront relativement présentes par rapport aux autres, et plus les variations entre les extrêmes seront grandes. Nous réutiliserons ces coefficients de pente α dans le paragraphe 5 de ce chapitre comme un indicateur de la dynamique de l'abondance annuelle. La figure 2-19 représente le coefficient α selon les années : on constate une légère tendance globale à la hausse, avec des variations d'une année sur l'autre.

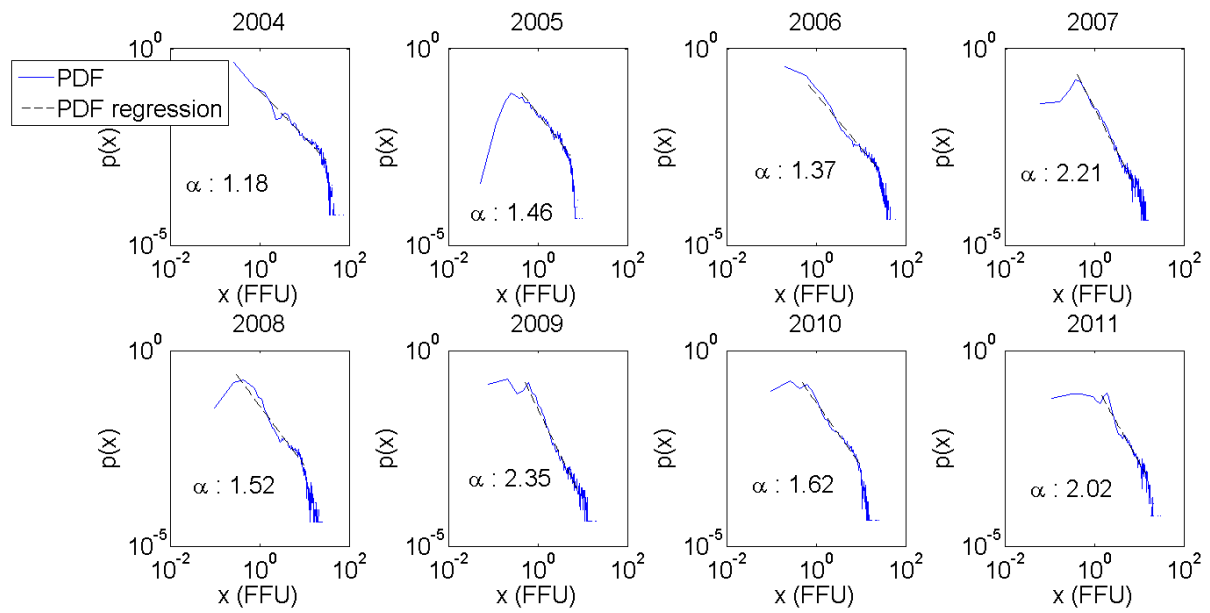


Figure 2-18. PDF annuelles des données de fluorescence (courbe bleue) en échelle log-log et lois de puissance associées (ligne en pointillée noire), avec les coefficients de pente α .

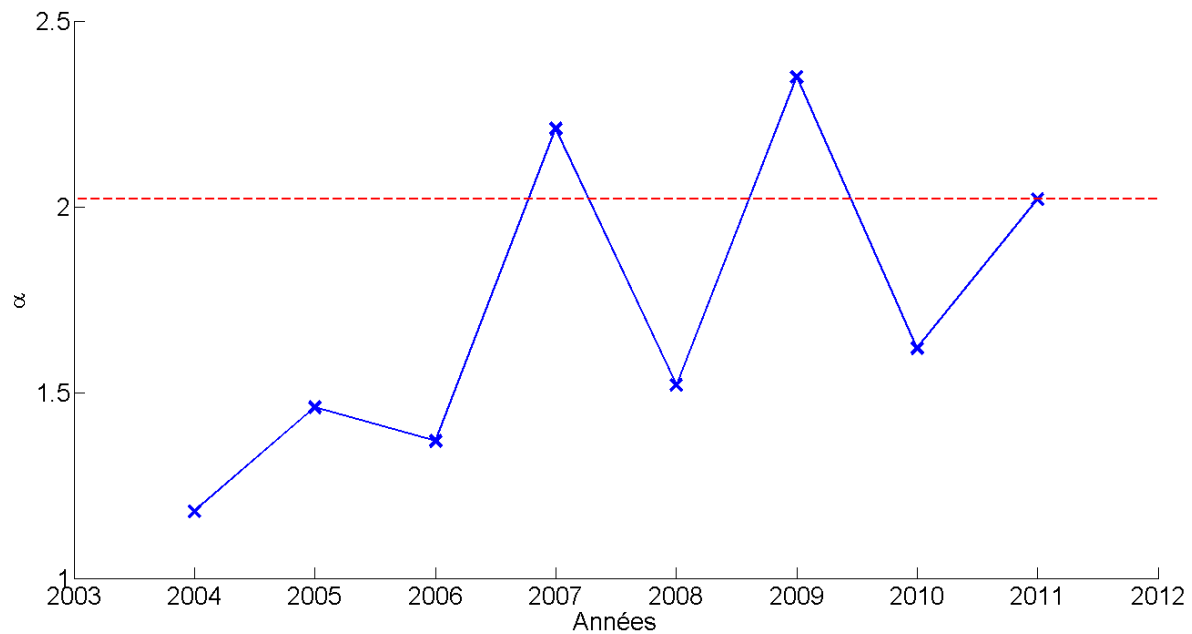


Figure 2-19. Pentas α (PDF) versus années ; en rouge (horizontal) la pente α interannuelle (2004 à 2011).

4.1.2 PDF sur d'autres systèmes automatisés

Nous allons ici utiliser des jeux de données provenant d'autres systèmes automatisés capables de mesurer la fluorescence dans la Manche, afin de voir s'il existe un comportement commun au niveau de ce paramètre et de ses extrêmes. Nous utilisons donc le même protocole que celui présenté dans le paragraphe précédent pour réaliser la figure 2-16 et l'appliquons sur le jeu de données de fluorescence provenant de la bouée MAREL Iroise (voir chapitre 1; paragraphe 3.1.2), ainsi que celui provenant de la station automatisée anglaise L4 (voir chapitre 1; paragraphe 3.3).

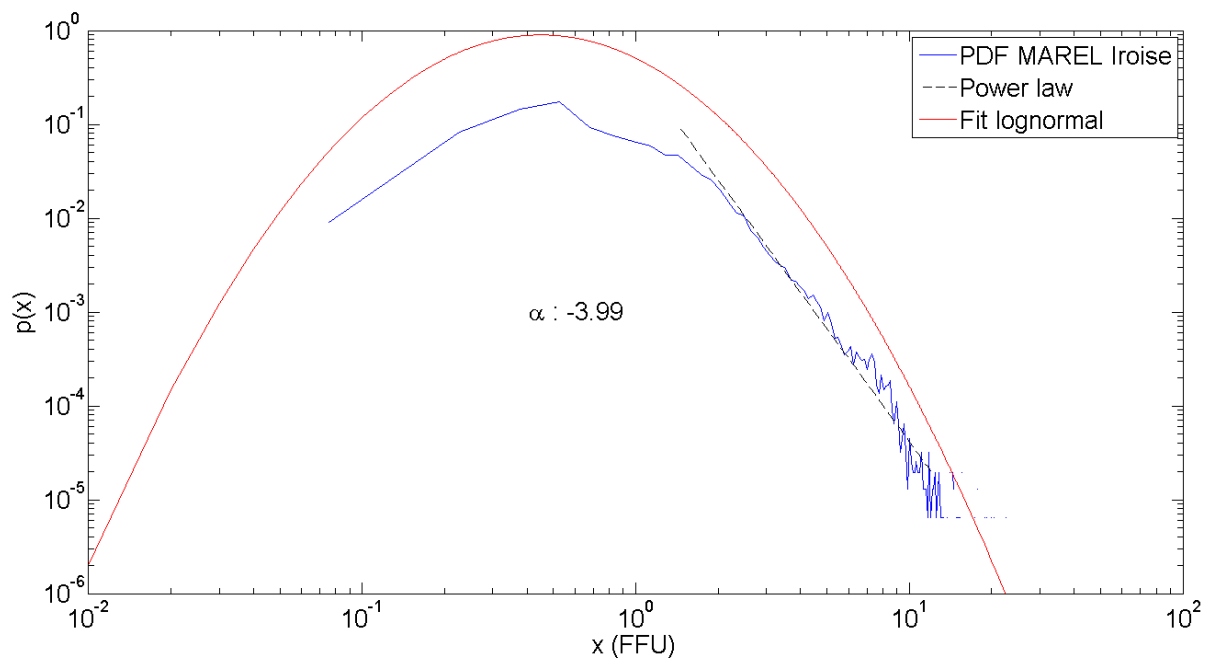


Figure 2-20. Fonction de densité de probabilité en échelle log-log sur les données MAREL Iroise de fluorescence entre 2004 et 2011 (courbe bleue). La courbe rouge représente un ajustement effectué avec la loi-normale et la droite noire représente un ajustement en loi de puissance.

La figure 2-20 montre la PDF en échelle log-log du proxy de la biomasse phytoplanctonique enregistrée entre 2004 et 2011, ainsi qu'un ajustement en loi de

puissance et un autre en loi log-normale. La fréquence d'échantillonnage de MAREL Iroise est la même que celle de MAREL Carnot, c'est-à-dire 20 minutes. La pente issue de la loi de puissance est au environ de 4, ce qui est quasiment le double de la pente trouvée avec les données MAREL Carnot. L'ajustement en loi de puissance est bon pour les valeurs comprises entre 1 et 10, et contrairement à la précédente PDF présentée en figure 2-16, dans le cas présent, les données dépassent très rarement les 15 FFU. La figure 2-21 quant à elle reprend le même protocole, à l'exception du fait que le jeu de données utilisé provenant de la station L4 est plus petit : il se situe entre 2009 et 2012 pour un total de 3 ans, contrairement aux 8 ans pris en compte dans nos précédentes analyses. La fréquence d'échantillonnage de ce système est de 1 heure, et la pente issue de la loi de puissance est égale à 3,6, ce qui est plus proche de la pente de MAREL Iroise que de celle de MAREL Carnot. Cet ajustement est bon pour les valeurs comprises entre 1 et 8, mais encore une fois les valeurs extrêmes fortes dépassent rarement les 10 FFU.

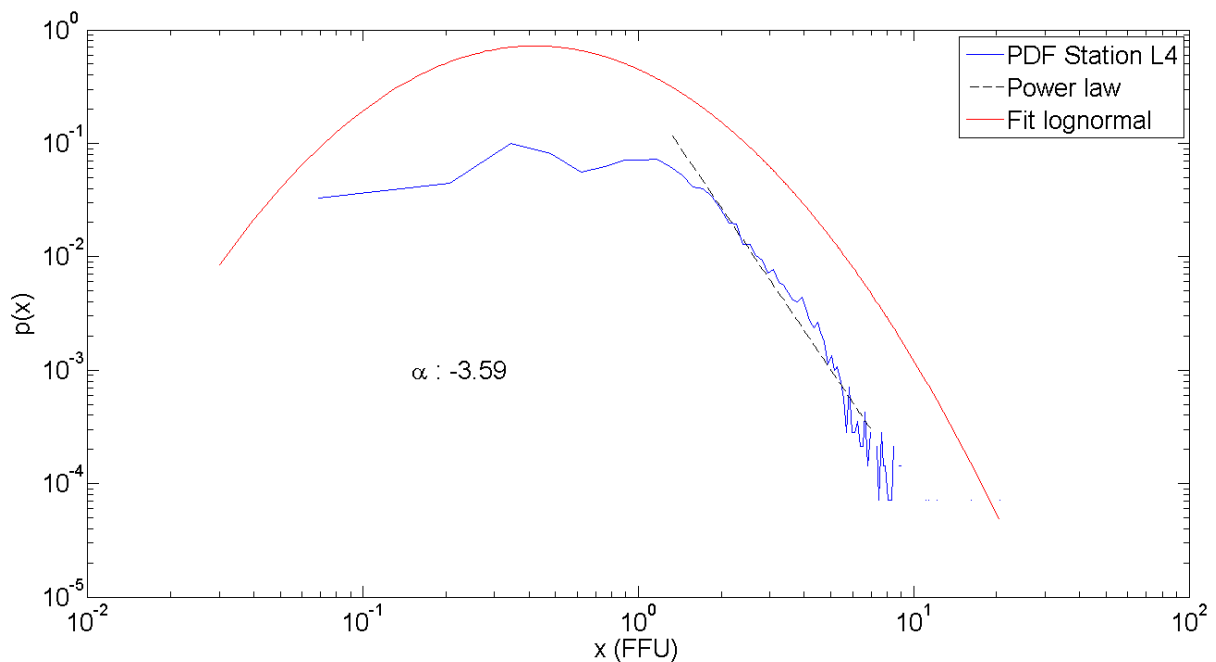


Figure 2-21. Fonction de densité de probabilité en échelle log-log sur les données de fluorescence de la station L4 entre 2004 et 2011 (courbe bleue). La courbe rouge représente un ajustement effectué avec la loi log-normale et la droite noire représente un ajustement en loi de puissance.

Dans les deux cas présentés dans ce paragraphe, l'ajustement en loi de puissance est meilleur que l'ajustement en loi log-normale, sauf pour les valeurs extrêmement petites comprises entre 0 et 1. Les grandes valeurs extrêmes issues de la station L4 et de MAREL Iroise dépassent difficilement les 15 FFU, contrairement aux valeurs issues de MAREL Carnot qui peuvent atteindre dans de rares cas les 40 FFU. Il y a quasiment un facteur 2 entre la pente α MAREL Carnot et la pente α MAREL Iroise. On constate que :

- Pour différents jeux de données la fluorescence (et donc l'abondance phytoplanctonique) ont une PDF qui obéit approximativement à une loi de puissance.
- Le coefficient α par contre, ne semble pas universel.

- Le paradigme utilisé en écologie qui voudrait que les données d'abondance soient distribuées de manière log-normale ne semble pas se vérifier pour les différentes productions primaires étudiées dans les zones côtières de la Manche.

4.2 Analyses basées sur la méthode EMD

4.2.1 Décomposition et filtration

Ici nous appliquons la méthode EMD sur les séries temporelles interannuelles MAREL Carnot de température et de fluorescence. Il y a respectivement 20 (voir figure 2-23) et 17 modes (voir figure 2-22) en plus des résidus. Dans les deux cas, si l'on somme la totalité des modes en plus des résidus, on retrouve exactement nos signaux de fluorescence et température interannuelle post-décomposition. Comme son nom l'indique, la méthode EMD est une méthode empirique, le nombre de mode qui résulte de la décomposition n'est pas dépendant de la longueur de la série sur laquelle on l'applique, mais dépend plus de la complexité et de l'hétérogénéité de cette dernière. Comme le montrent les figures 2-22 et 2-23, deux séries temporelles distinctes, mais s'étalant sur la même durée n'auront pas forcément le même nombre de modes après la décomposition. Par contre, pour une série temporelle donnée, le nombre de modes après la décomposition est stable. Par exemple, si l'on prend la matrice contenant les températures MAREL Carnot entre 2004 et 2011, quel que soit le nombre d'itérations que l'on pourrait effectuer avec la méthode EMD sur le signal de départ, la décomposition finale comportera toujours 17 modes et un résidu.

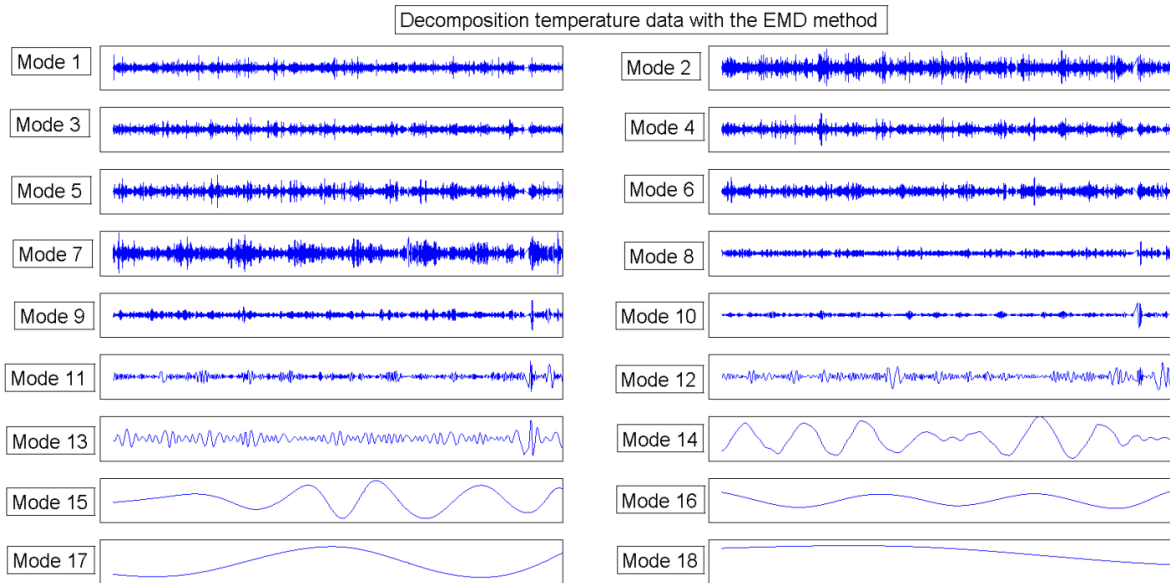


Figure 2-22. Décomposition EMD en 18 modes des données brutes de températures issues de MAREL Carnot entre 2004 et 2011. Il s'agit de l'ensemble des données ; le mode 1 correspond à la plus haute fréquence et le mode 17 à la plus basse fréquence. Le mode 18 est le résidu.

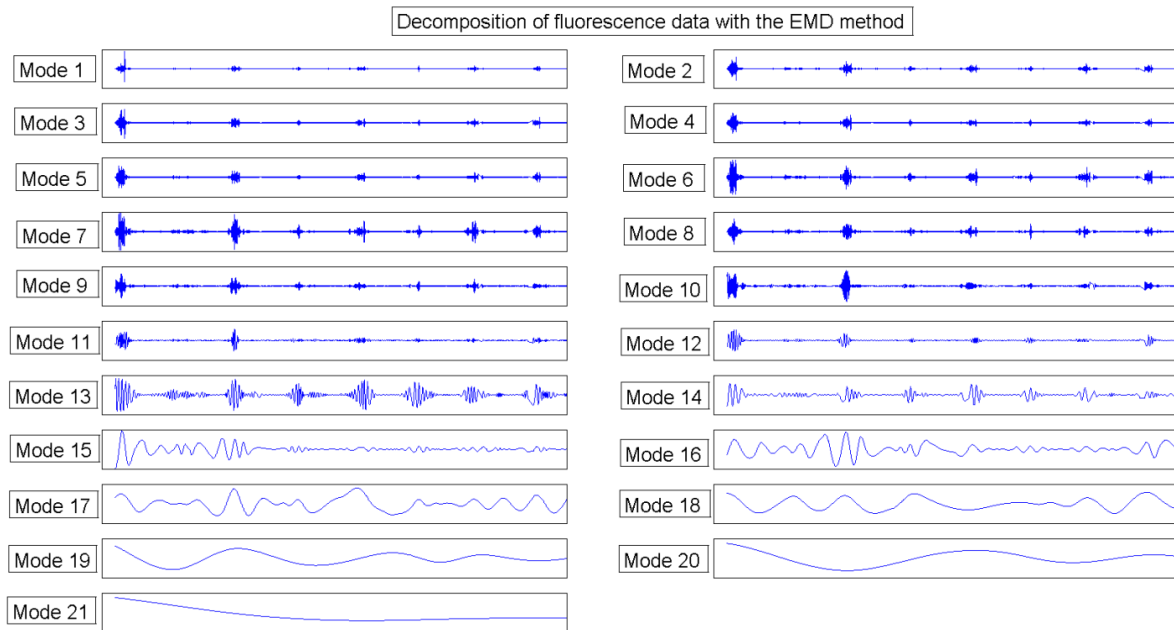


Figure 2-23. Décomposition EMD en 21 modes des données brutes de fluorescence issues de MAREL Carnot entre 2004 et 2011. Il s'agit de l'ensemble des données ; le mode 1 correspond à la plus haute fréquence et le mode 20 à la plus basse fréquence. Le mode 21 est le résidu.

Comme nous l'avons déjà vu dans le paragraphe consacré à la méthode EMD dans le chapitre 1 (Matériels et Méthodes), chaque mode possède une fréquence moyenne caractéristique. La figure 2-24 montre les modes de nos deux séries interannuelles de fluorescence et de température entre 2004 et 2011 en fonction de leur temps moyen caractéristique associé. Nous avons ici converti les fréquences caractéristiques en temps caractéristiques ($f = \frac{1}{t} \Rightarrow t = \frac{1}{f}$), afin de faciliter la lecture de cette figure. Il y a une croissance exponentielle, qui correspond à une décomposition quasi-dyadique. Comme on pouvait s'y attendre, les premiers modes correspondent à la plus petite échelle de temps, et plus les modes sont grands, plus l'échelle moyenne est grande.

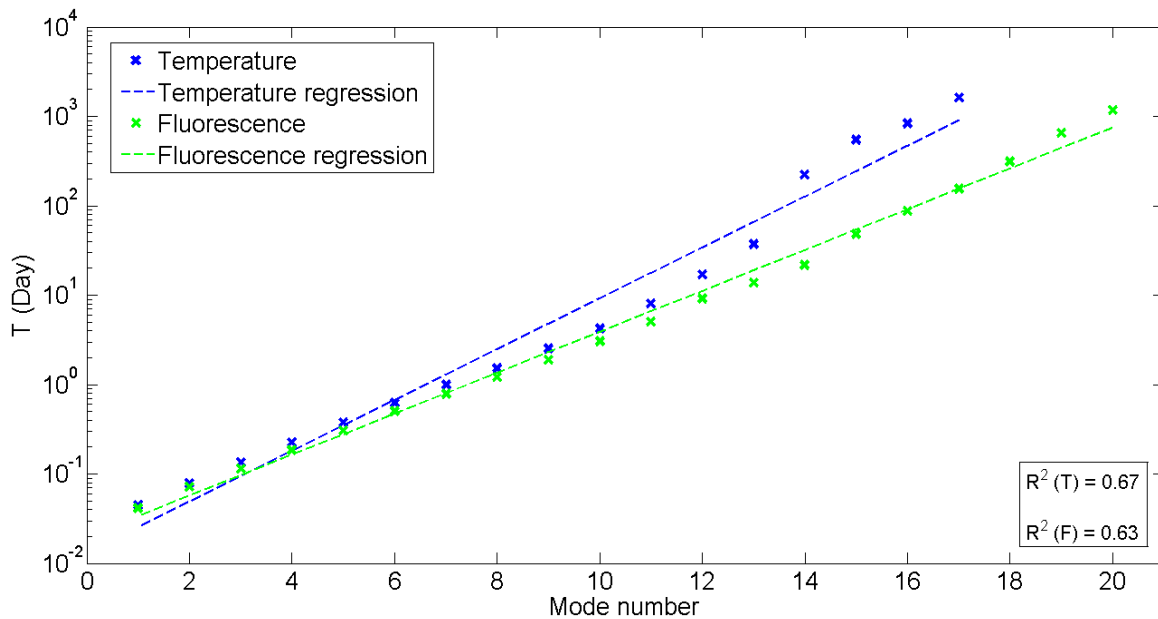


Figure 2-24. Evolution de l'échelle de temps moyen pour chaque mode, en fonction du nombre de modes, pour les données de température et de fluorescence ; une relation exponentielle est visible dans les deux cas.

Nous avons choisi de filtrer les données en utilisant le mode $n_0 = 12$ qui correspond à une moyenne de 5,07 jours. La figure 2-25 montre pour l'année 2006, les données brutes de fluorescence durant la période de bloom, la partie avec une large échelle correspond à la somme des modes 13 à 20, en plus du résidu ; et en dessous, la partie haute fréquence correspond à la somme des modes 1 à 11. Cette approche permet de visualiser de façon plus claire la dynamique et par conséquent, on discerne plus facilement les périodes de début et de fin du bloom printanier.

Cependant, il faut noter que les variations à haute fréquence provenant des données de fluorescence durant la période de bloom ne sont pas un bruit que nous devons supprimer ; il s'agit d'un signal à haute fréquence montrant la spécificité de la dynamique du bloom, avec des oscillations à hautes fréquences qui rappellent les systèmes hors d'équilibre, comme par exemple les tremblements de terre (voir figure 2-26). Cette analogie est également renforcée par le fait que les intensités dans les

deux cas suivent une loi de puissance : pour les tremblements de terre, c'est la loi de Gutenberg-Richter. A quand l'utilisation d'une magnitude logarithmique pour l'intensité des blooms ?

Nous avons vu précédemment que les blooms d'importante intensité possédaient des fluctuations plus importantes entre leurs valeurs extrêmes (ils sont plus hétérogènes) : ces dernières sont visibles par l'intermédiaire de la filtration réalisée avec la méthode EMD. Seules les données issues des systèmes automatisés à haute fréquence permettent de détecter ce type de comportement, ce qui nous apporte des nouvelles connaissances, et nous ouvre les portes d'importantes possibilités de recherches futures. Il s'agit en effet de l'un message de cette thèse : on constate que les blooms ne sont pas "lisses" et comportent en interne, d'importantes fluctuations. Ces fluctuations sont sans doute en rapport avec la turbulence qui agit sur le transport de matière et génère des hétérogénéités multi-échelles. Ceci est considéré dans la prochaine section.

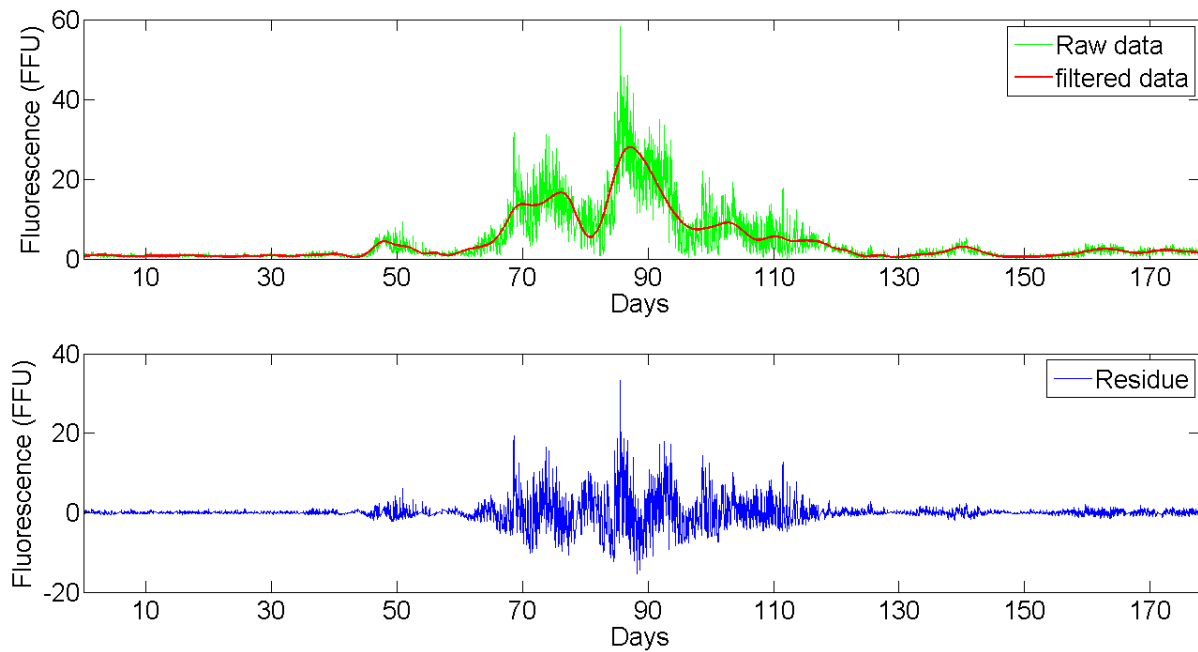


Figure 2-25. Données brutes de fluorescence MAREL Carnot sur la période de bloom en 2006, superposées à la tendance estimée en utilisant la méthode EMD, des modes 12 à 20, correspondant à un lissage à l'échelle de 5 jours. En dessous : la partie haute fréquence correspondant à la somme des modes 1 à 11.

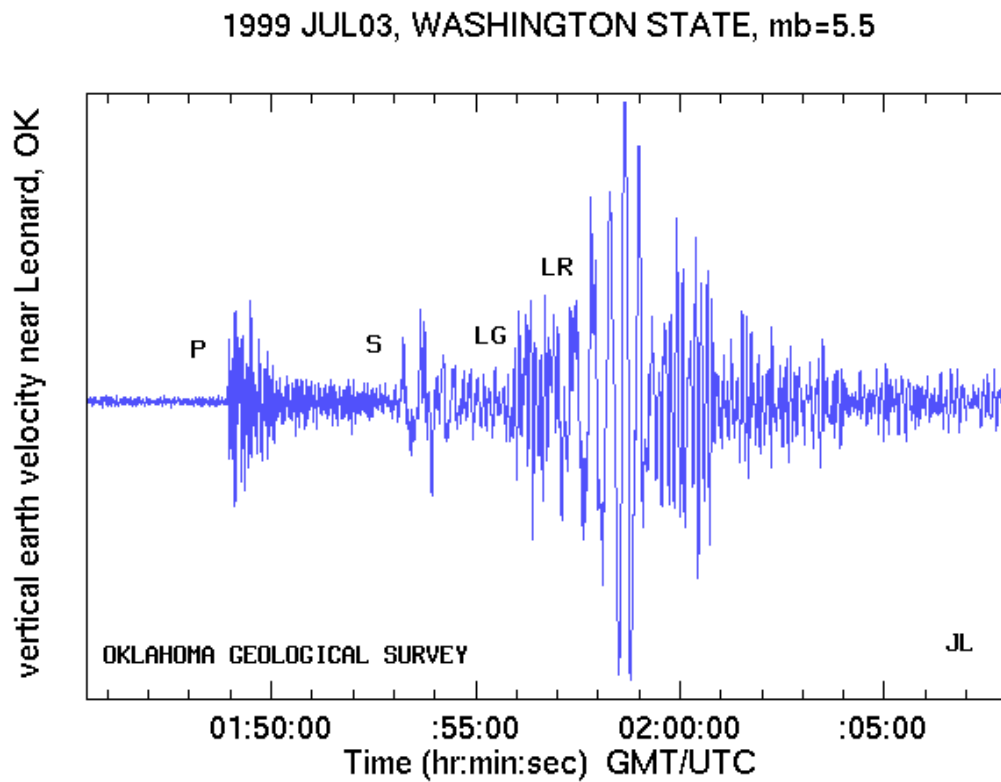


Figure 2-26. Exemple d'une séquence de tremblement de terre.

(<http://www.okgeosurvey1.gov/level2/ok.grams/R990703.html>)

4.2.2 Analyses spectrales HSA

Nous considérons maintenant l'information sur les dynamiques provenant des séries temporelles haute fréquence de température et de fluorescence de MAREL Carnot, par l'intermédiaire de la méthode EMD-HSA (voir chapitre 1 ; paragraphe 4.3.5), afin d'estimer les spectres de puissance. En cas d'invariance d'échelle, ces spectres en loi de puissance sont constitués comme suit :

$$h(\omega) \approx \omega^{-(1+\beta)} \quad (31)$$

où β est l'échelle de l'exposant de cette loi de puissance, avec β qui est égal à 0 pour un bruit, 2 pour un mouvement brownien et 5/3 pour la turbulence (Huang et al., 2008). La figure 2-27 montre qu'il y a une pente de 1,75 pour la température et de 1,24 pour la fluorescence. La valeur de pente pour nos températures est proche de 5/3 ce qui est le signe de la turbulence pleinement développée (Kolmogorov, 1941, Obukhov, 1941, Frisch, 1995). Nous pouvons également voir un léger pic vers les 12 heures, qui est probablement lié à l'impact que les cycles jour/nuit induisent sur la biomasse phytoplantonique par l'intermédiaire des mécanismes photosynthétiques. Ces propriétés des lois de puissance et leur pente associée ont déjà été consignées dans des études antérieures (Huang and Schmitt, 2014, Zongo and Schmitt, 2011b), mais avec des séries temporelles de fluorescence portant sur de plus courtes périodes. Le fait que β pour la fluorescence soit proche de 1,2 ne reçoit pour le moment pas d'explication théorique. Une telle valeur a déjà été relevée auparavant à partir de données hautes fréquences (Zongo and Schmitt, 2011b). Nous constatons néanmoins une loi d'échelle pour la dynamique de la fluorescence ; une telle loi d'échelle pourrait être certainement liée à la turbulence. Le fait que β ne soit pas 5/3 montre que la fluorescence est un scalaire actif, ayant une dynamique propre, en plus du transport turbulent.

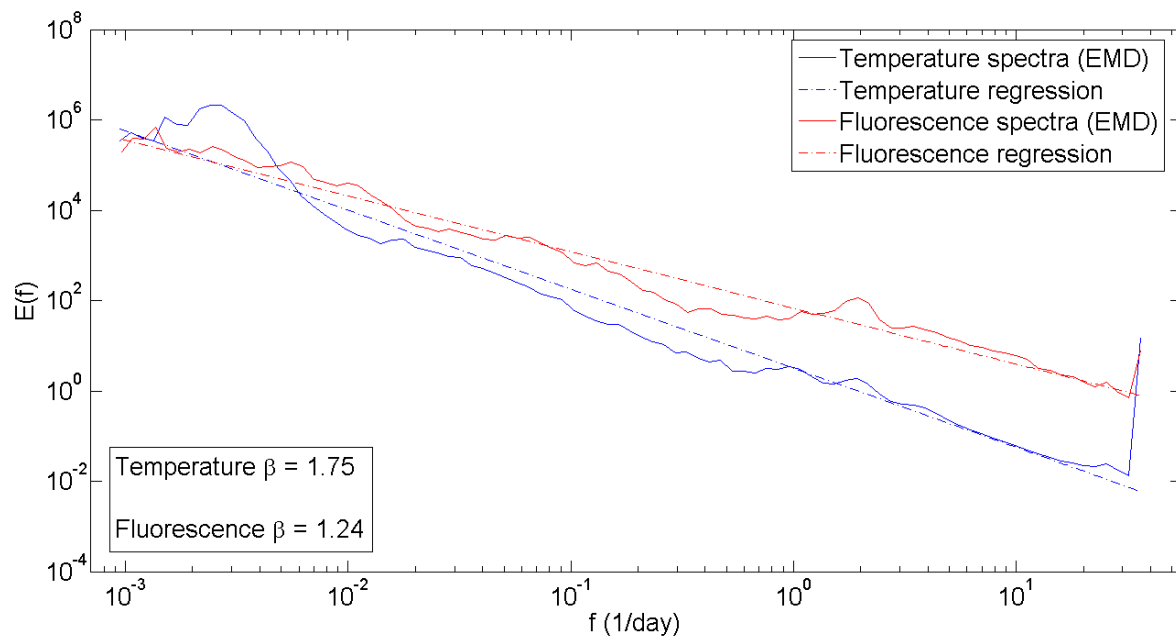


Figure 2-27. Spectres de puissance en échelle log-log, pour les données brutes de fluorescence et de température MAREL Carnot, estimé en utilisant la méthode EMD-HSA.

5 Relation avec la dynamique de la fluorescence

5.1 Relation α

Les spectres de puissance sont un indicateur de structuration dynamique, tandis que les PDF sont en relation avec la structuration statistique, mais n'apportent pas d'information sur la temporalité. Nous considérons ici les liens possibles entre les deux approches. La figure 2-28 montre les moyennes annuelles de fluorescence en fonction des pentes α issues des PDF annuelles (voir figure 2-18) ; le coefficient de corrélation R^2 est quasiment égal à 0,7, ce qui atteste une relation importante entre ces 2 paramètres.

On voit apparaître une tendance générale décroissante : plus les pentes sont faibles, plus on a des abondances moyennes importantes. Ceci indique qu'il y a

globalement une forte hétérogénéité ou intermittence quand les blooms sont importants : les blooms de forte intensité possèdent des fluctuations fortes.

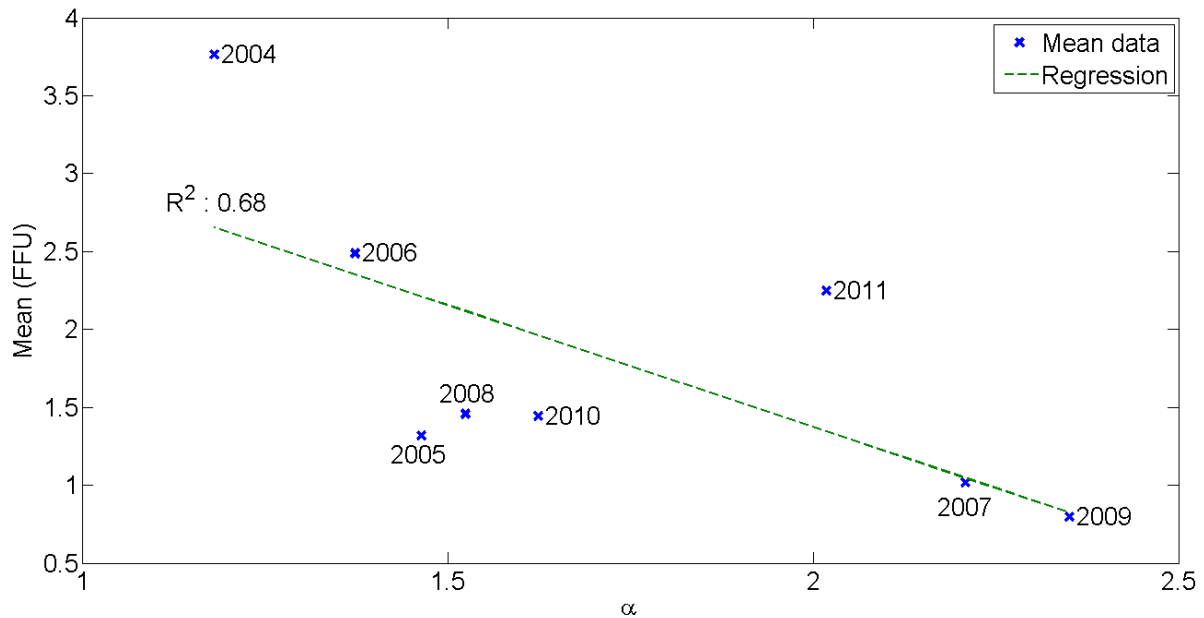


Figure 2-28. Moyennes annuelles de la fluorescence en fonction des coefficients α issus des PDF de fluorescence.

De la même manière, en figure 2-29, nous avons mis les pentes α en fonction des trois taxons phytoplanctoniques les plus représentatifs de notre zone d'étude, c.-à-d. : les *Cryptophyta* (cryptophycées); *Bacillariophyta* (diatomée); *Prymnesiophyceae* (*Phaeocystis*). Pour chaque taxon, nous avons créé une moyenne annuelle à partir des moyennes annuelles des comptages SOMLIT et REPHY. Dans les deux cas les données utilisées pour réaliser ces moyennes proviennent du point le plus proche de la côte (radiale Boulogne-sur-Mer) et des échantillonnages de surface. Pour les cryptophycées et les diatomées, on peut voir que leurs coefficients de corrélation R^2 est très proche de 0,9, ce qui implique une très forte relation de décroissance mutuelle entre la structuration statistique de ces blooms et les concentrations cellulaires de ces deux taxons. Au vu de la relation proposée dans la figure 2-28, on peut supposer un lien

entre les concentrations cellulaires de diatomée et cryptophycées et l'intensité des blooms.

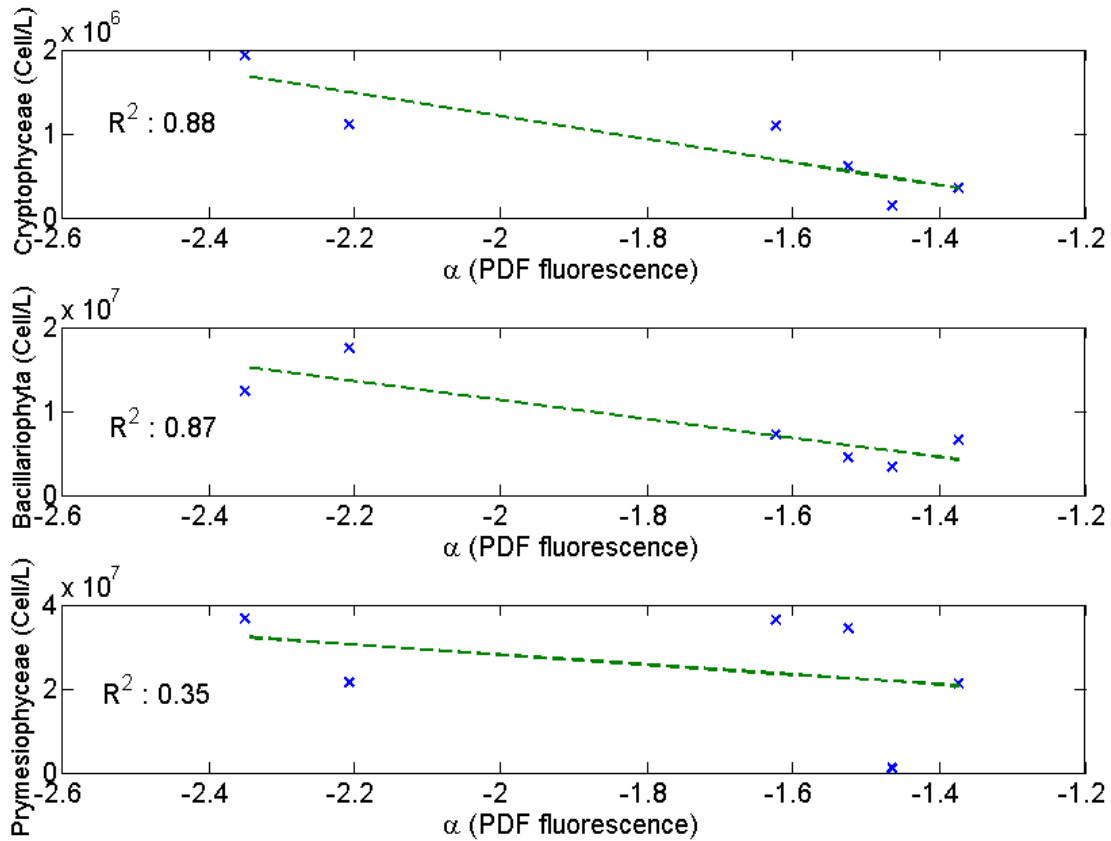


Figure 2-29. Relation entre les coefficients α issus des PDF de fluorescence et trois taxons phytoplanctoniques (*Prymnesiophyceae* ; *Bacillariophyta* ; *Cryptophyceae*)

La figure 2-30 montre que plus les blooms sont importants, plus les concentrations de ces deux taxons diminuent. On peut donc présumer que les fortes fluctuations que contiennent les blooms d'intensités importantes perturbent les mécanismes de succession des cryptophycées et des diatomées, contrairement aux prymnesiophycées, qui ne semblent ni être influencées par l'intensité des blooms ni par leurs structurations statistiques. Une étude menée dans la Mer du Nord, qui est

encore plus fortement touchée par les concentrations importantes de *Phaeocystis* dans ces blooms, montre que les faibles concentrations en nitrates sont un facteur limitant pour ce taxon (Riegman et al., 1992). Pour être plus précis, les prymnesiophycées profitent des changements de régime dans le milieu entre les nitrates et les phosphates, un rapport N/P élevé pourrait donc favoriser donc les proliférations de cette espèce.

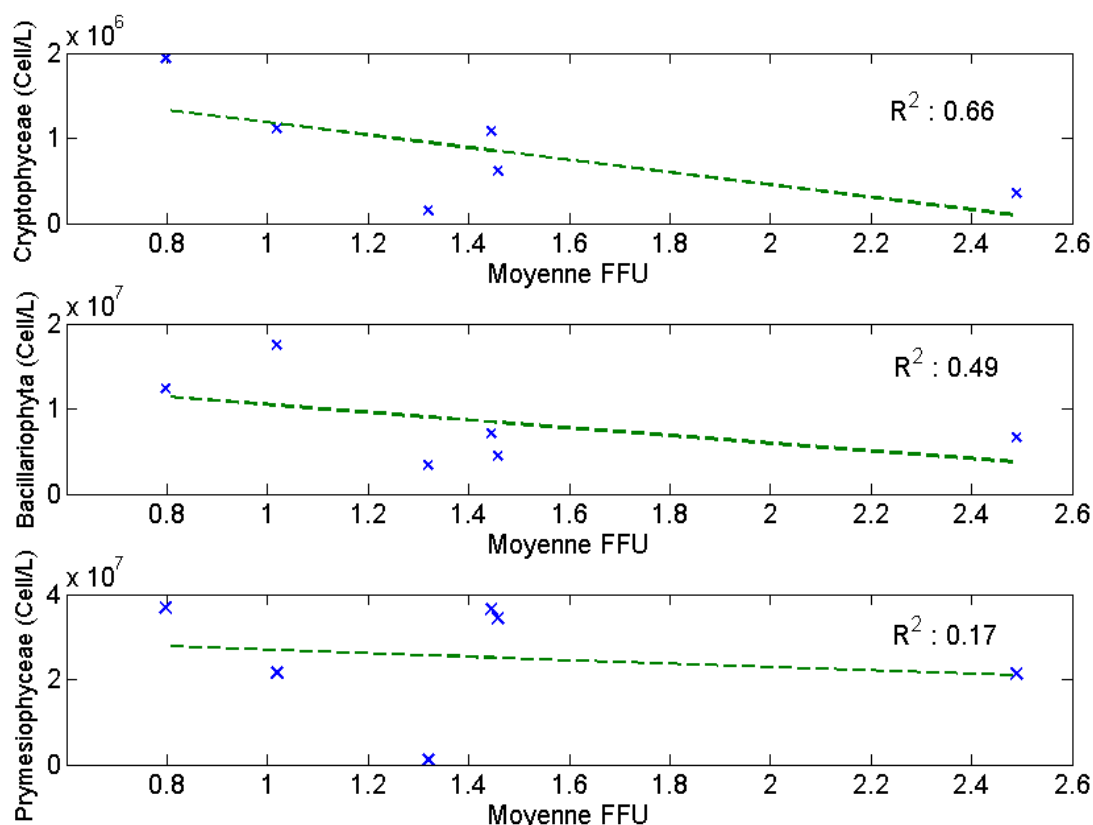


Figure 2-30. Relation entre les moyennes annuelles de fluorescence et trois taxons phytoplanctoniques (*Prymesioiphyceae* en haut ; *Bacillariophyta* au milieu ; *Cryptophyceae* en bas)

La figure 2-31 se base sur ces constations et l'on voit très clairement l'influence de ce changement de régime : plus le rapport N/P augmente, plus les concentrations cellulaires de *Phaeocystis* sont importantes. Une synthèse récente montre que les apports azotés sous une forme bio-disponible sont en constante augmentation dans le milieu marin (Schlesinger, 2009). Actuellement, il y aurait plus de 124 teragrammes d'azote par an qui se retrouveraient dans le milieu marin sur les 150 teragrammes d'azote par an déversés sur la terre par les hommes : cette importante quantité d'azote est transportée par divers mécanismes comme la percolation des eaux souterraines, les apports fluviaux, les apports atmosphériques... On peut donc supposer que le facteur anthropique conditionne la dynamique interannuelle de prymnesiophycées, qui, à son tour, influence indirectement la dynamique interannuelle de cryptophycées et des diatomées. La figure 2-32 met ce phénomène en avant, mais les diatomées ne semblent pas subir d'impact direct de *Phaeocystis* : ce mécanisme s'explique facilement par le fait que les diatomées sont physiologiquement dépendantes des silicates contrairement aux prymnesiophycées, il n'y a donc aucune compétition entre ces deux espèces au niveau de ce sel nutritif.

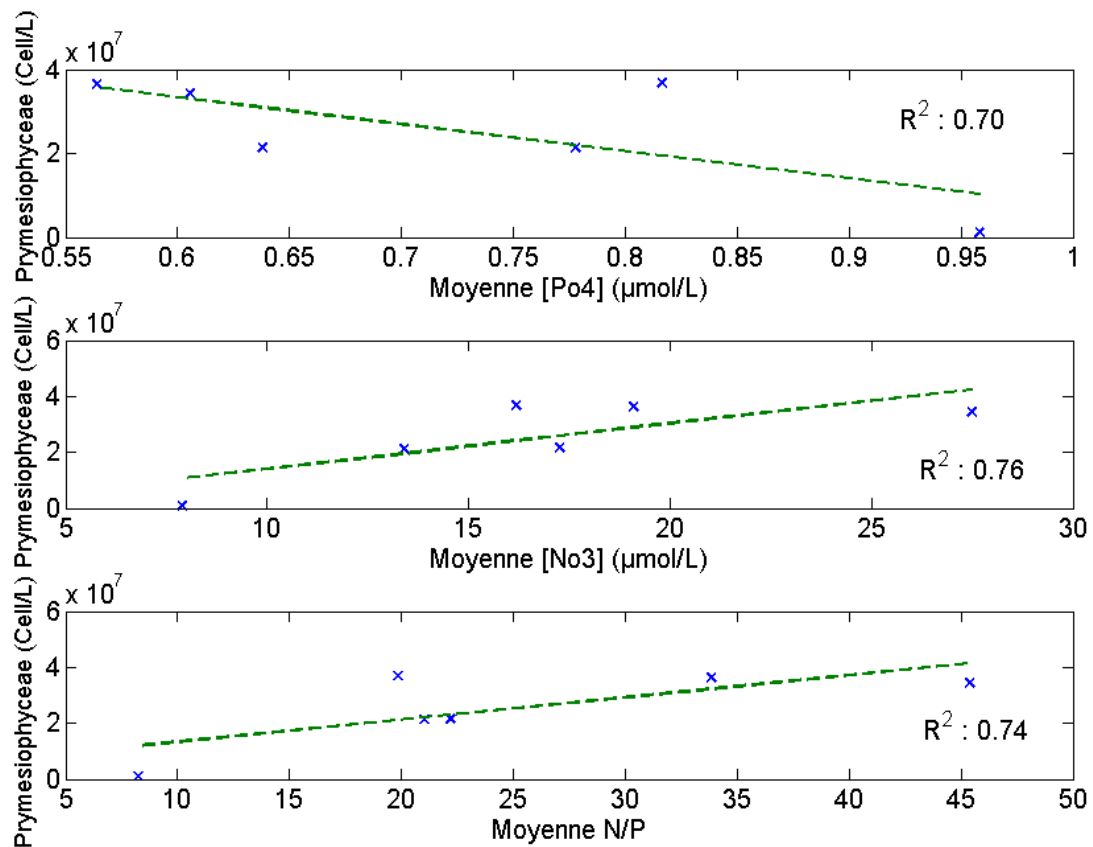


Figure 2-31. En haut : relation entre les moyennes annuelles de phosphates MAREL Carnot et les concentrations cellulaires de pymesiophycées. Au milieu : relation entre les moyennes annuelles de nitrates MAREL Carnot et les concentrations cellulaires de pymesiophycées. En bas : relation entre les moyennes annuelles du rapport N/P et les concentrations cellulaires de pymesiophycées

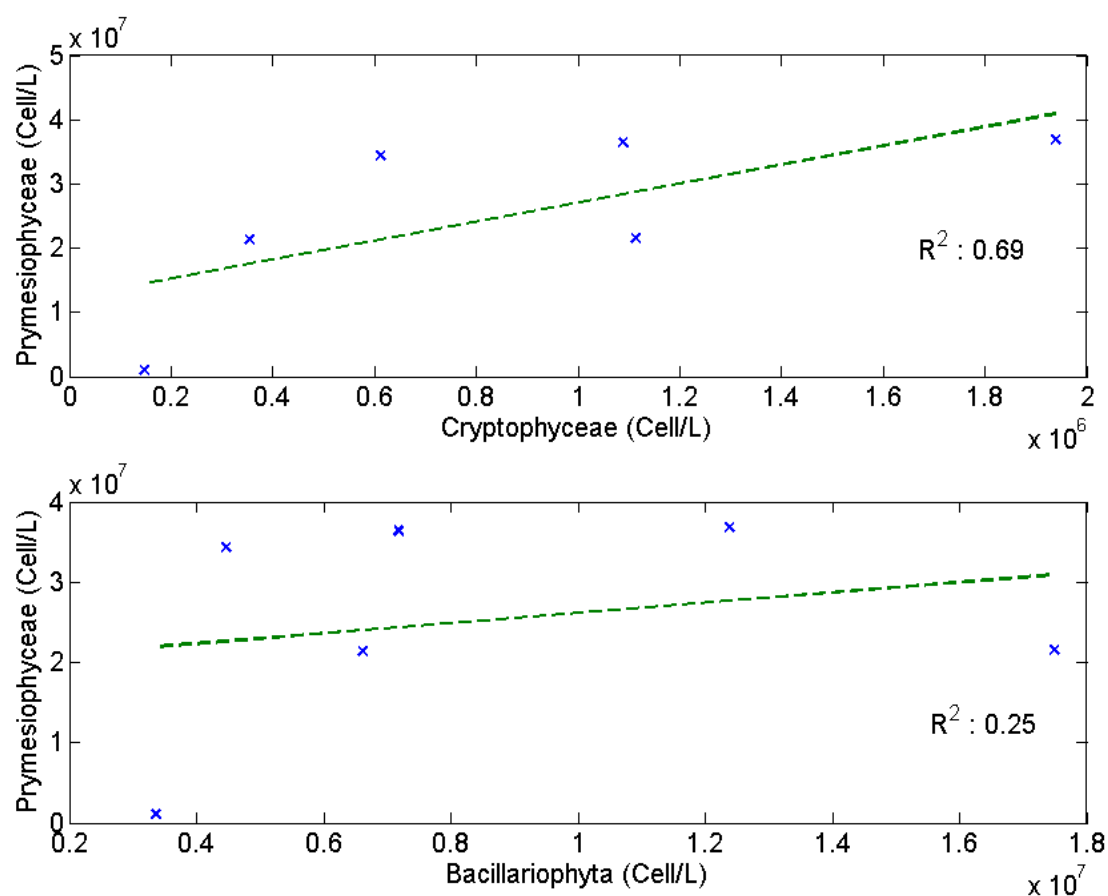


Figure 2-32. En haut : relations entre les prymésiophycées et les cryptophycées. En bas: relations entre les prymésiophycées et les diatomées.

5.2 Relation 6

Dans la figure 2-33, nous comparons la dynamiques des périodes de bloom à la dynamique des périodes pré-bloom. Afin qu'il n'y ait aucune ambiguïté sur les dates de début et de fin de bloom, nous avons filtré les données de fluorescence avec la méthode EMD (voir paragraphe 6.2) pour obtenir une séparation temporelle précise. Les périodes pré-bloom correspondent à la totalité des périodes entre les blooms, c'est-à-dire que ces périodes sont à cheval sur deux années. Par exemple la période de bloom en 2010 est comparée à la somme des périodes post-bloom en 2009 et des

périodes pré-bloom en 2010. La figure 2-31 compare les structurations dynamiques des périodes pré-bloom à celles des périodes de bloom, et comme dans le paragraphe 4.2.2 de ce chapitre, les pentes spectrales β sont calculées à partir de la méthode EMD-HSA. On peut voir sur cette figure qu'il y a une assez bonne relation entre ces deux coefficients de pente spectrale, ceci implique que la dynamique post-bloom joue un rôle important sur la dynamique du futur bloom qui va se produire.

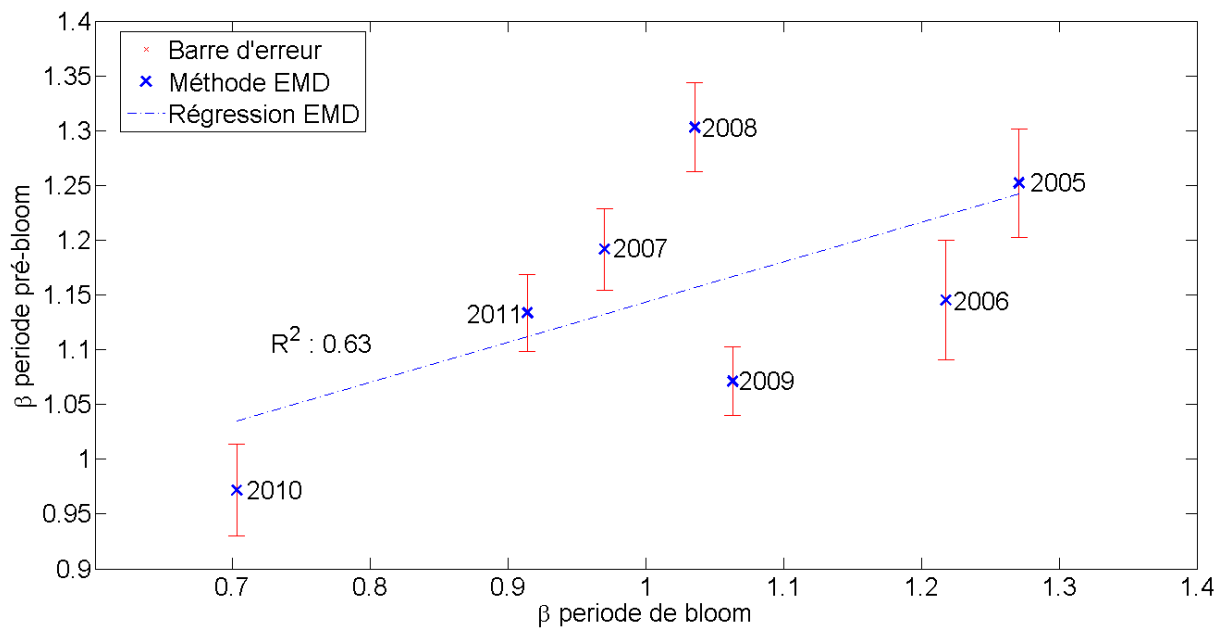


Figure 2-33. Pentes spectrales pré-bloom en fonction des pentes spectrales durant la période de bloom. Les pentes spectrales sont calculées avec la méthode EMD-HSA.

5.3 Relation α vs β

Nous avons vu dans la figure 2-11 qu'il existait un lien entre les températures hivernales et la fluorescence. Pour continuer dans la même direction, nous avons considéré la relation entre les pentes spectrales β (méthode EMD-HSA) des températures pendant l'hiver et la fluorescence. La figure 2-34 représente β en

fonction de α : les pentes hyperboliques de la fluorescence suivent les pentes spectrales des températures hivernales. Dans le cas présent, pour le calcul des périodes hivernales, nous avons utilisé l'hiver météorologique qui correspond aux 3 mois statistiquement les plus froids de l'année, c'est-à-dire dans l'hémisphère Nord les mois de décembre, janvier et février. On voit clairement se dessiner une tendance globale avec un R^2 qui est quasiment égal à 0,9, ce qui indique que les années qui possèdent d'importantes plages de variations entre leurs valeurs extrêmes (valeurs de α faibles) sont associées en moyenne avec les pentes spectrales β faibles, c'est-à-dire ayant plus d'intermittence temporelle.

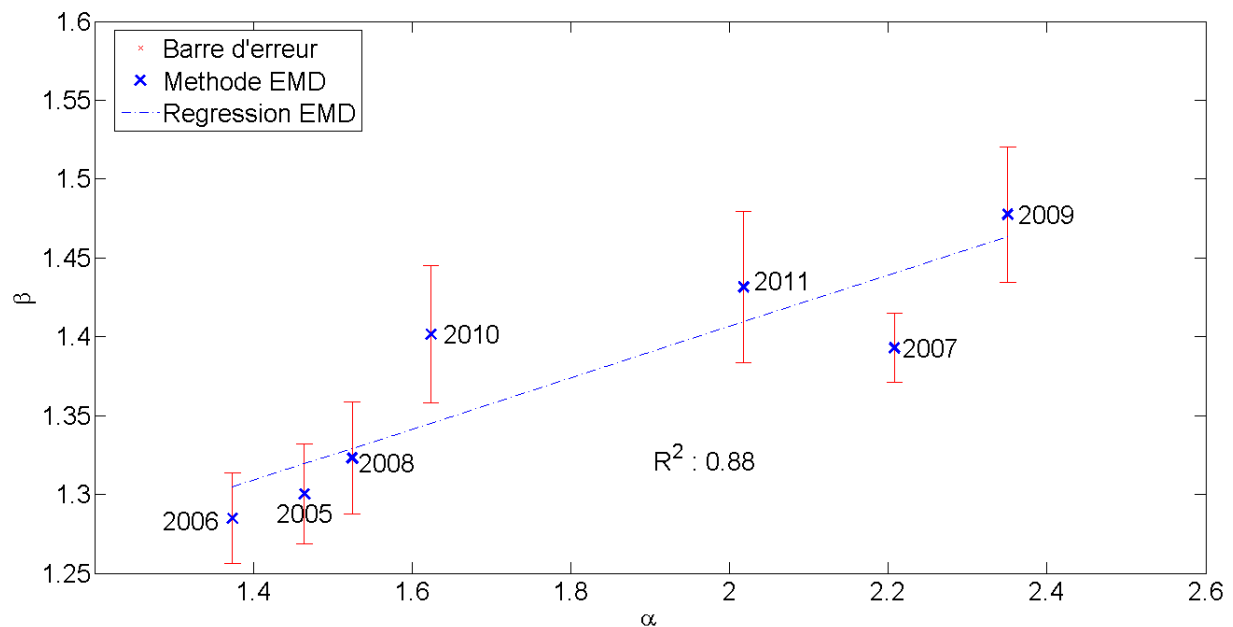


Figure 2-34. Pentes spectrales (β) issues des hivers météorologiques en fonction des coefficients α issus des PDF de fluorescence.

Les pentes spectrales sont également un indicateur de la structuration temporelle : plus l'indice de Hurst est faible (pour un mouvement brownien fractionnaire nous avons $H = ((\beta - 1)/2)$), moins il y a des répétitions dans les données et plus leur hétérogénéité est importante. Cette relation peut indiquer que plus la

structuration temporelle et les fluctuations hivernales sont importantes, plus on aura tendance à avoir de forte variation entre les données extrêmes dans les données de fluorescence l'année suivante. La figure 2-35 utilise les même pentes spectrales β (pour les températures hivernales), mais ces dernières sont mises en fonction des moyennes annuelles de fluorescence pour les périodes de bloom suivant ces hivers. Il y a toujours une relation entre les deux paramètres, mais elle est beaucoup moins importante que celle que l'on avait trouvée pour la figure 2-34 : les valeurs de β élevées sont associées à des fluorescences faibles. Les figures 2-28 et 2-34 sont bien sûr complètement compatibles avec la figure 2-35.

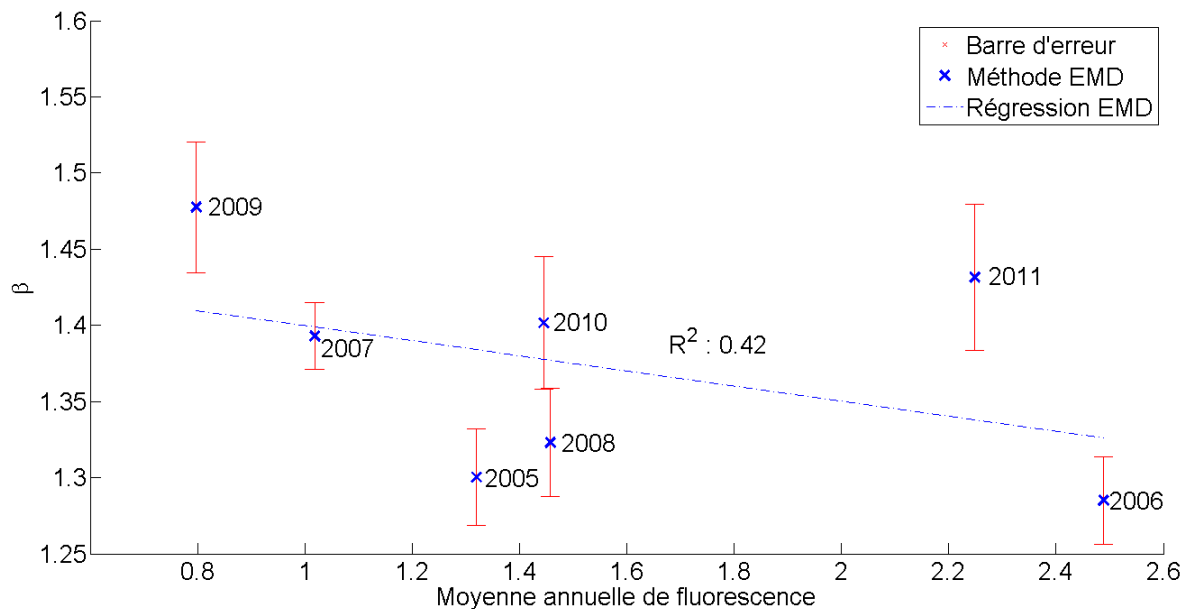


Figure 2-35. Pentes spectrales (β) issues des hivers météorologiques en fonction des moyennes annuelles de fluorescence.

5.4 La stratification, explication du mécanisme ?

5.4.1 Profils

Nous venons de voir que la température avait un impact important sur la dynamique des blooms. On peut donc présupposer une influence de la stratification. Malheureusement, les jeux de données issues du système automatisé MAREL Carnot ne nous permet pas d'avoir des profils de températures, nous allons donc utiliser les profils réalisés durant les échantillonnages SOMLIT (point côte de la radiale de Boulogne-sur-Mer). La figure 2-36 compile les profils de températures réalisés durant l'année 2008 : plus les couleurs tendent vers le rouge, plus les températures sont chaudes. On voit un phénomène de stratification se mettre en place sur la période comprise entre le jour 120 et 250, avec une différence assez marquée entre les températures de surface et de fond (nous verrons plus bas comment utiliser un indice plus quantitatif de la stratification). Chaque bande verticale colorée correspond à un profil de température, on peut voir encore plus clairement la formation de ce phénomène de stratification si l'on prend un profil de manière autonome. La figure 2-37 montre le profil de température SOMLIT réalisé au cours du mois de septembre 2008 : on voit clairement qu'il y a une différence de environ 1,4°C entre la surface et le fond, la couche de mélange a une épaisseur d'environ 10 m. Ceci correspond à 0,14°/m, ce qui est le même ordre de grandeur que la stratification observée en milieu profond (16° sur 200m soit 0,08°/m) (Cronin and Sprintall, 2009). Notons également que dans une étude en milieu côtier, une stratification a été mise en évidence avec la formation d'une pycnocline vers les trois mètres ; cette couche de surface aurait une influence sur les sels nutritifs et par conséquent sur les blooms phytoplanctoniques (Hanson and Donaghay, 1998). Cette référence, et l'ordre de grandeur de la stratification moyenne observée, expliquent que nous considérons ici une légère stratification en surface, bien que généralement, en raison du caractère énergétique et

méga-tidal de la Manche orientale, il soit considéré que la Manche orientale est un milieu assez homogène selon la verticale.

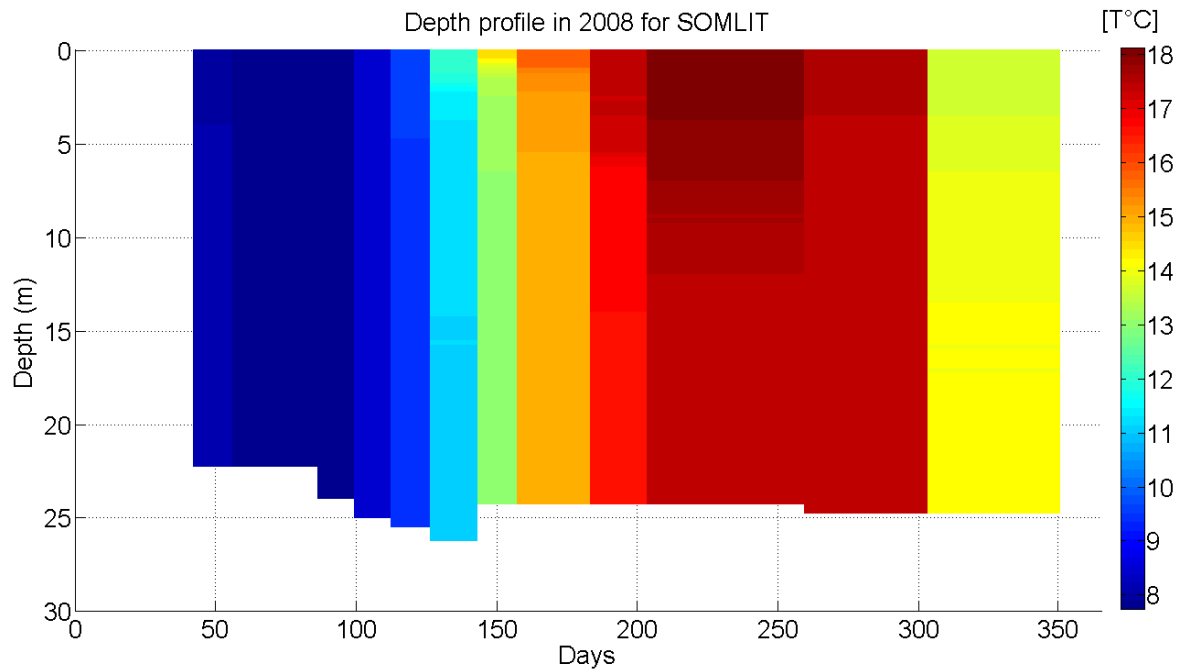


Figure 2-36. Profil annuel des température SOMLIT en 2008 pour le point côte. Une légère stratification est visible à certains moments de l'année.

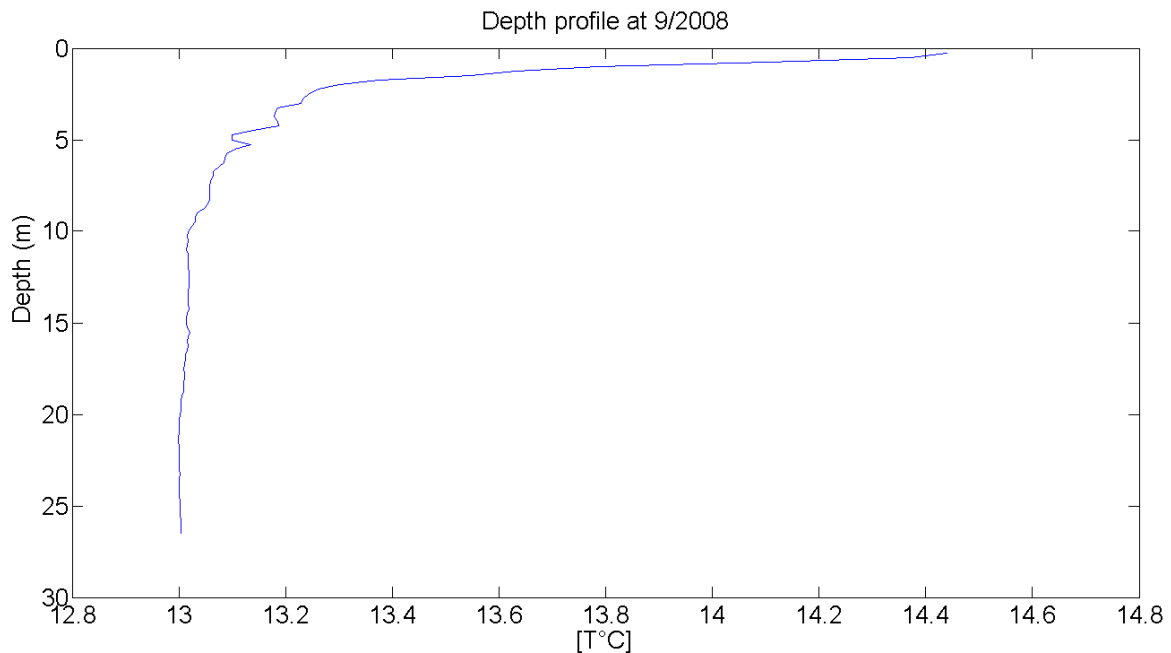


Figure 2-37. Profil des températures SOMLIT pour le point côte en septembre 2008. Ceci correspond à une couche de mélange (mixed layer) d'environ 10m, avec une différence d'environ 1,4°C, soit 0,14°C/m.

5.4.2 Dynamique de la stratification

La figure 2-38 met en parallèle les deltas de température surface/fond issus des profils SOMLIT entre 2007 et 2011 pour le point côte de la radiale de Boulogne-sur-Mer et les données brutes de fluorescence MAREL Carnot pour les mêmes années. On voit globalement que la stratification apparaît durant la période printemps/été ; nous avons vu dans le paragraphe 2-1 de ce chapitre que la climatologie était un bon outil pour se rendre compte de la dynamique interannuelle d'un paramètre. La figure 2-39 se base sur cette constatation et présente la climatologie des deltas de températures SOMLIT. Une tendance claire à la stratification se dégage durant la période printemps/été (forte augmentation des deltas T°C). On peut aussi voir qu'entre Janvier et Mars, le delta de température augmente doucement et à partir de fin Mars, il y a une rupture de pente : la dynamique du delta de température augmente brusquement

et rapidement jusqu'à la fin du moi de Mai. Puis la courbe se met à décroître de façon assez homogène de Juillet à Octobre.

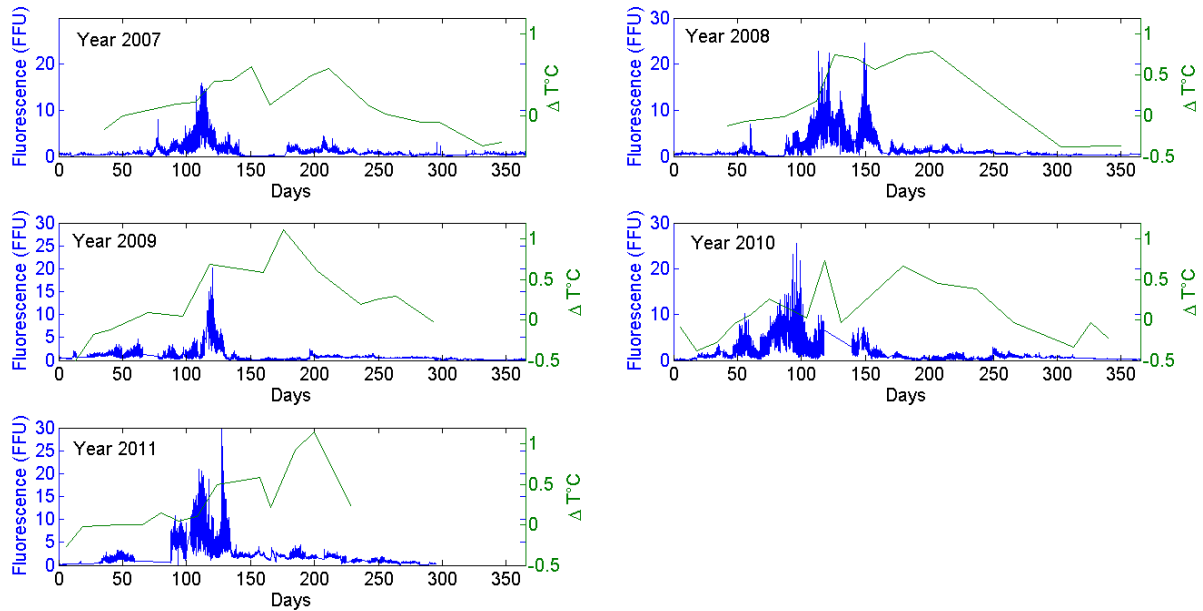


Figure 2-38. Superpositions des profils de fluorescence MAREL Carnot et des deltas surface-fond SOMLIT pour le point côte entre 2007 et 2011.

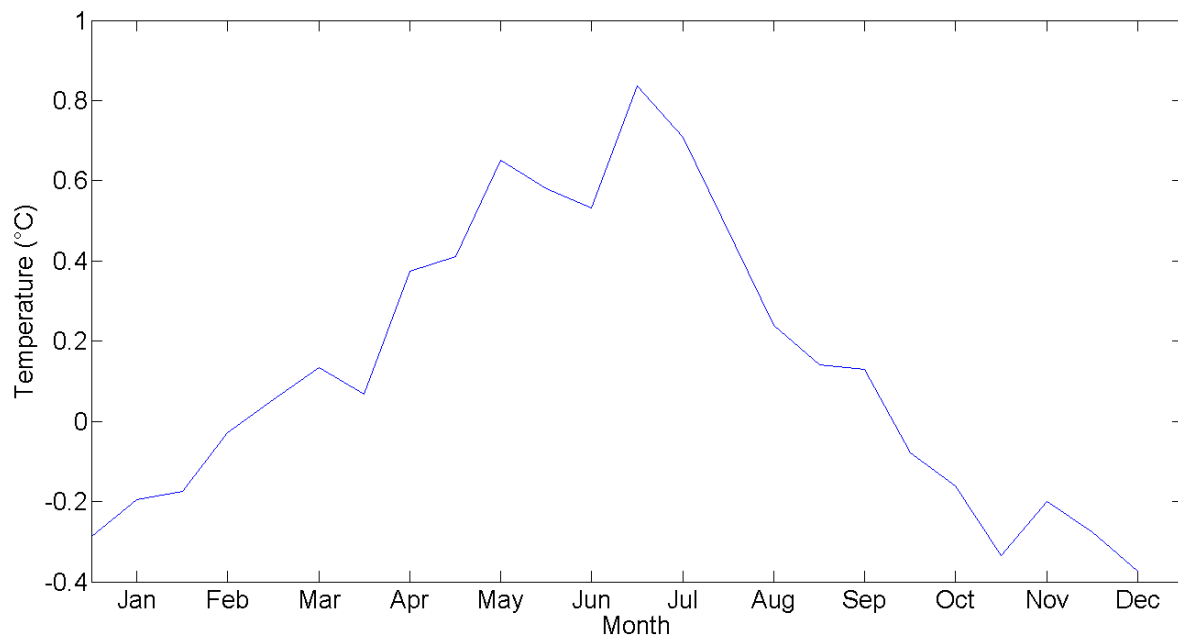


Figure 2-39. Climatologie des deltas de températures (entre la surface et le fond) SOMLIT pour le point côte entre 2007 et 2011.

5.4.3 Relation avec la stratification

Nous venons de voir avec la climatologie présentée en figure 2-39 qu'il y avait une brusque et rapide augmentation de la stratification entre mi-mars et mi-juin. Ce phénomène est intéressant car cette période correspond au début du printemps. Sur la figure 2-40, nous avons donc mis en relation les moyennes annuelles des deltas de températures entre le 15 avril et le 15 mai et les moyennes annuelles de fluorescence MAREL Carnot. On voit qu'il y a une bonne relation entre les deux paramètres avec le coefficient de corrélation R^2 proche de 0,7 : plus la stratification au printemps est importante, plus les blooms qui vont suivre ont tendance à avoir une intensité faible. On peut donc présupposer que la stratification dans notre zone d'étude joue un rôle de facteur tampon en bloquant la disponibilité en sels nutritifs dans la couche de surface. La stratification printanière dans les eaux de surface en milieu côtier, qui est généralement très peu étudiée car considérée comme négligeable, pourrait en fait

jouer un rôle, par des mécanismes de rétroaction qui influenceraient directement l'intensité des blooms qui vont suivre.

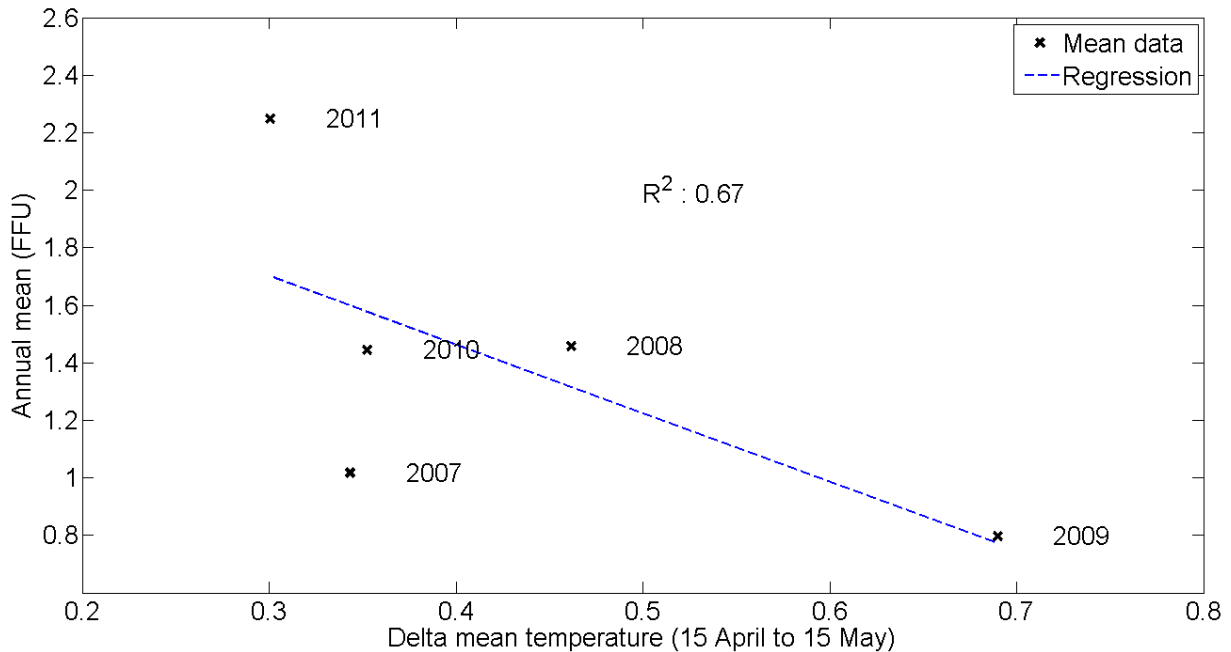


Figure 2-40. Moyenne des deltas de températures SOMLIT pour le point côte entre le 15 avril et le 15 mai en fonction des moyennes annuelles de fluorescence.

6 Discussion

Les mesures hautes fréquences à point fixe sont considérées comme étant indispensables pour la compréhension des mécanismes multi-échelles qui sont présents dans l'océan (Dickey, 1991, Dickey et al., 1993, Chavez et al., 1997, Chang and Dickey, 2001, Bensoussan et al., 2004, Nam et al., 2005, Dur et al., 2007). Durant ces dernières années, les systèmes automatisés à point fixe ont commencé à se démocratiser en milieu côtier, ils sont installés dans de nombreux endroits à travers le monde, comme à Venise (Lovato et al., 2013), en Corée du sud (Nam et al., 2005), ou en Californie (Frieder et al., 2012). Des discussions sont également en cours en France au niveau national, pour équiper les services d'observation SOMLIT de systèmes haute

fréquence. Ces systèmes automatisés à point fixe sont essentiels pour mieux comprendre les mécanismes complexes présents dans les écosystèmes côtiers.

Le phytoplancton est un élément essentiel dans les écosystèmes marins et sa dynamique est soumise à de nombreux forçages à multi-échelles qui apportent une grande hétérogénéité (Turchin, 2003, Ritchie, 2009). Les données d'abondance sous la forme de séries temporelles comportent d'importantes fluctuations (Blarer and Doebeli, 1999), d'où l'importance de l'utilisation des jeux de données hautes fréquences, qui nous permettent d'étudier et de détecter leurs intermittences très localisées. Il est donc important d'utiliser des outils numériques capables de s'adapter aux jeux de données hautes fréquences, et aux fortes fluctuations subies par ce type de système. Les études préliminaires menées sur les quantiles de la température et de la fluorescence laissent apparaître une grande variabilité interannuelle dans leurs extrêmes. On voit qu'il y a deux patterns dans les extrêmes de fluorescence :

- Un cycle possible de trois ans avec une décroissance dans les périodes cumulatives, dans le cas du quantile 10.
- Une alternance annuelle entre les périodes importantes et faibles, pour le quantile 90.

On relève un comportement plus stochastique au niveau des quantiles 10 et 90 de la température. Pour la fluorescence, il y a aussi une tendance à l'augmentation conjointe entre les valeurs seuils et les temps de retour.

Ces systèmes automatisés hautes fréquences engendrent des bases de données très importantes (dans le cas de MAREL Carnot plusieurs dizaines de milliers de points), il est donc possible de construire des PDF très précises. Nous avons pu mettre en évidence, à l'aide d'une PDF réalisée sur les données interannuelles MAREL Carnot, que l'on pouvait modéliser l'ensemble de cette PDF et de ses extrêmes avec une loi de puissance, et que le modèle log-normal couramment utilisé pour approximer les abondances, bien que non loin de notre PDF s'était révélé plus imparfait. Cette loi log-normale communément utilisée en écologie (Wang et al., 2006, Widdicombe et al.,

2010, Feuchtmayr et al., 2012, Tsirtsis et al., 2008, Segura et al., 2013), a été remise en question à plusieurs reprises (Nummelin, 1998, Williamson and Gaston, 2005). On a pu constater une certaine généralité d'une PDF en loi de puissance dans deux différents systèmes pour la fluorescence. Par contre, l'exposant α de l'invariance d'échelle est variable, allant de 2 (MAREL Carnot) à 3,6 (L4 station) voire 4,0 (MAREL Iroise).

En ce qui concerne le déterminisme dans les blooms et ses relations avec les différents forçages, nous avons ici montré que les températures et la disponibilité en lumière et en phosphate avaient un impact direct sur les abondances de fluorescence. En premier lieu, nous avons trouvé que les températures hivernales pré-bloom avaient une influence sur leur intensité : les faibles températures hivernales engendrent des blooms de forte intensité le printemps suivant. Comme nous l'avons vu par l'intermédiaire de la figure 2-40, ce phénomène est possiblement lié à la stratification des eaux de surface : pour des faibles températures hivernales, la brusque augmentation des températures printanières pourrait créer une plus grande stratification, ce qui diminuerait l'apport de sels nutritifs dans les eaux de surface et donnerait naissance à des blooms de plus faible intensité. Dans ce cadre, il serait intéressant dans les années à venir de continuer dans cette voie-là, tout en prenant en compte l'intensité des vents, qui peut avoir un impact sur la stratification en milieu côtier (Haapala, 1994), ainsi que les apports d'eau douce (Simpson et al., 1990). Comme l'on pouvait s'y attendre, la disponibilité de la lumière est aussi directement liée à l'intensité des blooms. Cette relation n'est pas surprenante, au vu des connaissances actuelles. Enfin, nous avons trouvé une relation inverse entre l'abondance en phosphates et l'intensité des blooms.

En regardant plus précisément, à une échelle annuelle, la relation entre les moyennes annuelles de fluorescence et les pentes issues de leur PDF (voir figure 2-28), nous avons constaté que les blooms de forte intensité comportaient d'importantes fluctuations. Cela montre que ces blooms intermittents ne sont absolument pas lisses, compte tenu de l'advection turbulente et de la complexité des dynamiques de

populations. Ce type de bloom comporte par conséquent des épisodes d'oscillations à hautes fréquences.

La méthode EMD permet la visualisation de ces oscillations en séparant la tendance des fluctuations (voir figure 2-25). Cette méthode a aussi l'avantage de pouvoir être utilisée sur des séries temporelles hautes fréquences comportant des valeurs manquantes, afin d'isoler la tendance et d'en extraire localement les fluctuations hautes fréquences. Cette méthode est aussi utilisée pour calculer les spectres de puissance à partir des données irrégulières, de manière à analyser localement la dynamique et d'en extraire des informations sur l'amplitude et la fréquence. Nous l'avons ici utilisée pour faire un lien entre la structuration temporelle des températures hivernales (par l'intermédiaire des pentes spectrales) et la structuration de l'intensité de la fluorescence. Cette forte corrélation que nous avons trouvée n'a pas d'explication mécanique ; cependant, elle peut être utilisée pour effectuer des prédictions sur l'intensité et la structuration des blooms printaniers, en se basant sur les températures hivernales en amont.

Nous avons aussi vu que les cryptophycées et les diatomées étaient dépendantes de la structuration statistique, ainsi que de l'intensité des blooms, contrairement aux prymnesiophycées qui quant à elles, sont influencées par les changements de régime entre les nitrates et les phosphates, elles sont donc sous l'influence directe du rapport N/P. Les concentrations en prymnesiophycées augmentent de manière conjointe avec les concentrations en cryptophycées, ce phénomène a probablement un lien avec la production régénérée.

La dynamique des blooms phytoplanctoniques est complexe, liée à moult paramètres et différents forçages, assujettie à des relations non-linéaires et stochastiques. Leurs dynamiques comportent différentes échelles et l'utilisation des données hautes fréquences est nécessaire à l'extraction et à l'étude de ces domaines. Ici nous avons utilisé un jeu de données multiparamétrique hautes fréquences issues de systèmes automatisés pour étudier les blooms de phytoplancton dans le milieu

côtier à hautes fréquences. Plusieurs lois ont été trouvées, néanmoins leur universalité reste à évaluer. Cependant l'utilité méthodologique des approches ici proposées est susceptible d'être universelle.

Chapitre 3. Comparaison des réseaux de surveillance en milieu côtier

1 Introduction

Nous avons vu dans les chapitres précédents, que les séries temporelles en géosciences issues du milieu côtier étaient soumises à une série de variations déterministes liées à plusieurs forçages (astronomiques, annuels, journaliers, les cycles de marées,...). Et à une série de fluctuations stochastiques, qui sont réparties sur une large échelle spatiale et temporelle. Les températures de surface semblent avoir une influence sur le phytoplancton (Derot et al., 2014, Devreker et al., 2010, Gómez and Souissi, 2008) qui est le premier échelon du réseaux trophique dans les écosystèmes marins (voir chapitre 1 ; paragraphe 5.1). Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la comparaison entre différents réseaux de surveillance (basses et hautes fréquences). Un intérêt tout particulier sera porté à l'étude de la variabilité temporelle des températures sur les côtes françaises de la Manche, en utilisant des jeux de données provenant de deux systèmes automatisés à point fixe. Le premier est un mouillage équipé d'une sonde SeaBird, localisé dans en Manche occidentale, plus précisément dans la baie de Morlaix (voir chapitre 1 ; paragraphe 3.2). Et le second est notre système automatisé MAREL Carnot, qui est située en Manche orientale, plus précisément à la sortie du port de Boulogne-sur-Mer (voir chapitre 1 ; paragraphe 3.1.1). Dans les deux cas, les données provenant de ces systèmes automatisés ont été enregistrées à haute fréquence, c'est-à-dire que nous disposons de plus d'une mesure par heure. Actuellement, de nombreuses études ont mis en avant l'importance de l'utilisation de ce type de bases de données (Chang and Dickey, 2001, Chavez et al., 1997, Dickey, 1991, Dickey et al., 1993, Zongo and Schmitt, 2011b, Blain et al., 2004, Schmitt et al., 2011, Etcheber et al., 2011, Lanoux et al., 2013, Maneux et al., 2010), pour avoir une meilleure compréhension des mécanismes qui pourraient interagir avec le milieu marin. Deux colloques sur ce sujet ont été organisés ces dernières années : un colloque RESOMAR en septembre 2009, et un colloque "hautes fréquences" pour marquer les 10 années du système MAREL Carnot en juin 2014 à Boulogne-sur-Mer.

Un ouvrage collectif est en préparation suite à ce colloque, à paraître en 2015 chez CNRS Editions.

Dans un premier temps, nous avons comparé les réseaux hautes fréquences aux réseaux basses fréquences, qui sont localisés en Manche orientale. Dans ce cadre-là, nous verrons aussi l'impact potentiel que pourrait avoir le barrage Marguet sur les bases de données enregistrées par la balise MAREL Carnot. Puis, nous avons regardé l'impact que pourrait avoir les températures de la Manche occidentale sur la Manche orientale, à plusieurs échelles de temps. Pour cela nous disposons de 7 années communes entre les bases de données issues de MAREL Carnot et de la Seabird implantée à Roscoff. Comme dans le chapitre précédent, nous regarderons la climatologie de ces jeux de données, avant d'étudier leurs structurations dynamiques par l'intermédiaire d'analyses spectrales. Nous comparerons aussi ces séries temporelles en utilisant la méthode des co-spectres (voir chapitre 1 ; paragraphe 6.4.1), ainsi que la récente méthode TDIC (voir chapitre 1 ; paragraphe 6.4.2). Nous fermerons ce chapitre par une comparaison spectrale des températures qui se base sur les quatre systèmes automatisés en milieu côtier suivants : MAREL Carnot, MAREL Iroise, VENUS et la SeaBird Roscoff.

2 Réseaux hautes fréquences versus basses fréquences

Dans ce paragraphe nous comparons le système de suivi haute fréquence MAREL Carnot aux deux réseaux de suivi basse fréquence SOMLIT et SRN. Dans le cadre de cette comparaison, nous utiliserons les séries temporelles les plus proches de MAREL Carnot pour les réseaux basses fréquences, c'est-à-dire les points les plus proches de la côte et qui sont effectués en surface. Tout au long de ce paragraphe, le code couleur utilisé pour comparer les données brutes est identique : les courbes vertes pour les données MAREL Carnot, les points rouges pour les données SOMLIT et les croix bleues pour les données SRN. Les différents paramètres mis en parallèle dans cette étude sont les suivants : la température, les proxys de la biomasse

phytoplanctonique, l'oxygène dissous les nitrates, les silicates et les phosphates. Les bases de données MAREL Carnot, au niveau des sels nutritifs, comportent un nombre conséquent de valeurs manquantes. Dans ce contexte nous effectuons aussi une comparaison des moyennes annuelles entre les différents réseaux. Nous finirons ce paragraphe sur l'une des causes potentielles à ce si grand nombre de valeurs manquantes dans le jeux de données de sels nutritifs MAREL Carnot.

2.1 Comparaison température, fluorescence, oxygène dissous

La figure 3-1 montre une comparaison des températures entre nos trois réseaux de surveillance (SOMLIT, SRN et MAREL Carnot). A première vue, il y a une bonne concordance entre nos trois types de séries temporelles. On peut tout de même voir un point du réseau SRN en 2008 vers le jour 180 qui semble être erroné. En 2006, on peut relever une autre discontinuité dans la concordance : vers le jour 200, MAREL Carnot a capté une courte période plus chaude qui n'a pas été détectée par les deux réseaux basses fréquences. On peut se poser la question suivante : cette anomalie est-elle la résultante d'une hétérogénéité à petite échelle, ou les températures présentes dans la rade du port de Boulogne-sur-Mer auraient été plus chaudes ?

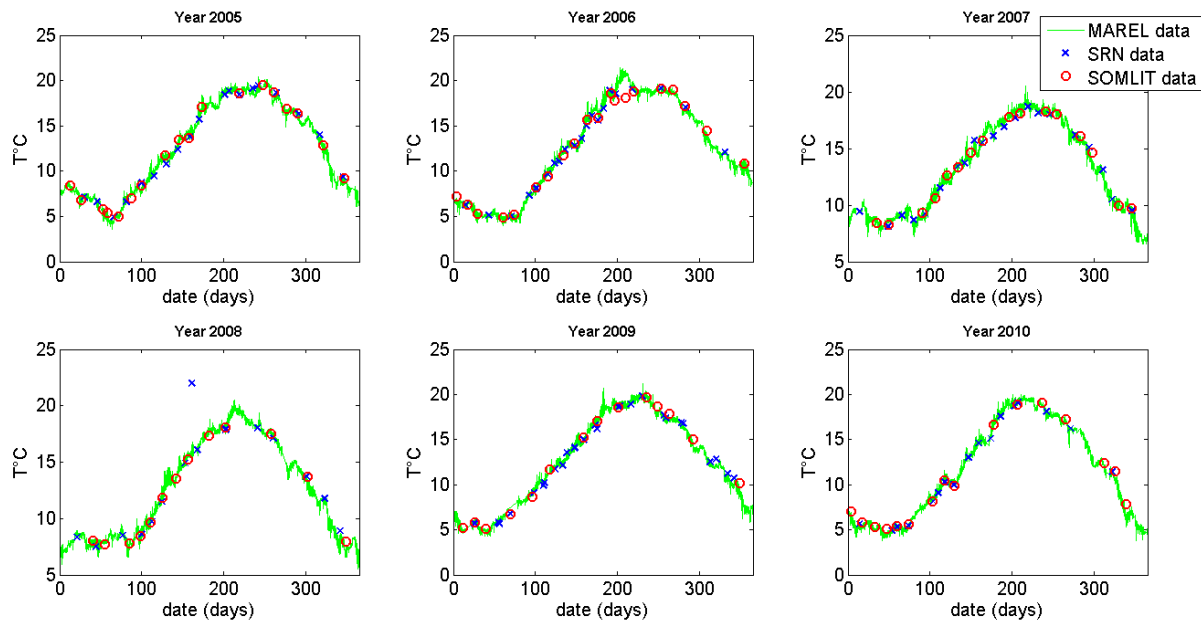


Figure 3-1. Comparaison des suivis basses fréquences (SOMLIT et SRN) et hautes fréquences MAREL Carnot, pour la température entre 2005 et 2010.

Nous avons vu dans le chapitre 1 Matériel et méthodes au paragraphe 3.2 que MAREL Carnot utilisait la fluorescence (mesurée en FFU) comme proxy de la biomasse phytoplanctonique, contrairement à SRN et SOMLIT qui utilisaient la chlorophylle a comme proxy (mesurée en $\mu\text{g/L}$). On ne peut donc pas effectuer de comparaison directe. Nous allons par conséquent comparer leurs dynamiques : pour cela, nous avons normalisé nos trois séries temporelles par leur propre moyenne annuelle, ce qui nous permet de faire abstraction des unités. Comme pour les températures (voir figure 3-1), il y a une bonne concordance au niveau des dynamiques du proxy de la biomasse phytoplanctonique (voir figure 3-2). Mais l'on voit clairement que les deux réseaux basses fréquences ne captent pas les valeurs extrêmes et les fortes fluctuations qui leurs sont associées à haute fréquence (voir chapitre 2).

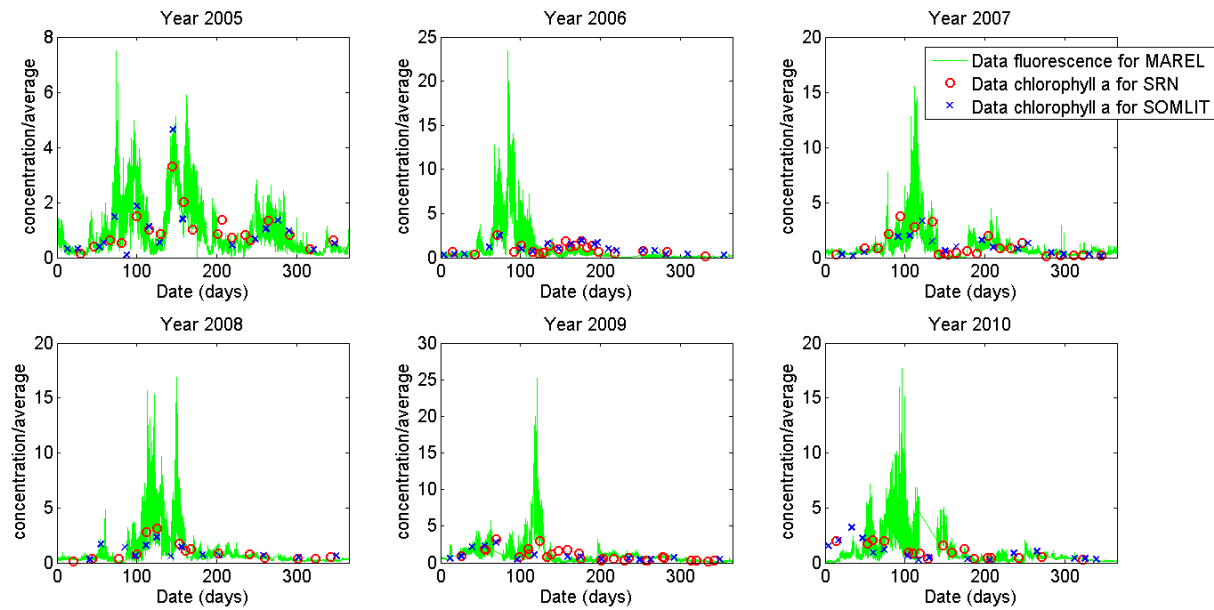


Figure 3-2. Comparaison des suivis basses fréquences (SOMLIT et SRN) et hautes fréquences MAREL Carnot, pour la fluorescence entre 2005 et 2010. Les graphes représentent les séries temporelles divisée par leur propre moyenne annuelle.

La figure 3-3 montre une comparaison entre nos trois réseaux de surveillance au niveau du paramètre d'oxygène dissous : seulement 3 années sont utilisées (2008, 2009, 2010), car la base de données MAREL Carnot comporte trop de valeurs manquantes pour les années comprises entre 2004 et 2007. La concordance est beaucoup moins bonne que dans les deux précédents cas (température et proxy de la biomasse phytoplanctonique). A première vue, les données SRN semblent plus proches de celles relevées par MAREL Carnot que celles enregistrées durant SOMLIT. La dynamique annuelle des données SOMLIT semble suivre la même dynamique que MAREL Carnot mais avec un décalage d'environ 3 mg/L, il s'agit peut-être d'un biais systématique lié au protocole de mesure ; pour rappel, les données MAREL sont mesurées *in situ* et les données SOMLIT *ex situ*. Contrairement à la dynamique des données SRN, où seulement certaines périodes de 2008 et 2009 coïncident avec les données MAREL, en ce qui concerne l'année 2010, la concordance est meilleure pour

ces deux suivis. On peut aussi remarquer qu'au cours de cette année 2010, le capteur d'oxygène de MAREL Carnot semble déréglé pour la période comprise entre le jour 190 et 220, car les valeurs extrêmes sont vraisemblablement trop importantes.

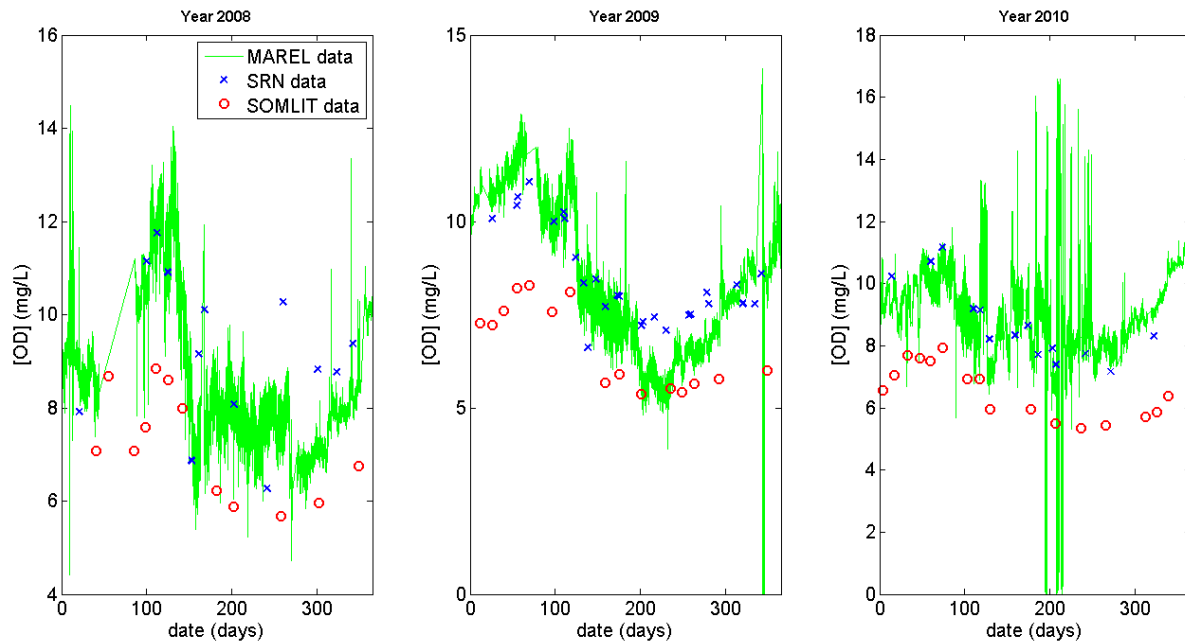


Figure 3-3. Comparaison des suivis basses fréquences (SOMLIT et SRN) et hautes fréquences MAREL Carnot, pour l'oxygène dissous entre 2008 et 2010.

2.2 Comparaison des sels nutritifs

2.2.1 Comparaison des données brutes

Comme on peut le voir sur les figures de comparaison de données brutes (voir figures 3-4, 3-6, 3-8), les jeux de données MAREL Carnot pour les sels nutritifs comportent beaucoup de valeurs manquantes (lignes droites continues vertes). Dans le but d'avoir une vue d'ensemble des variations interannuelles, nous avons aussi recoupé les moyennes annuelles issues des nos 3 réseaux de surveillance du littoral (voir figures 3-5, 3-7, 3-9). Pour MAREL Carnot, nous comparons les moyennes

provenant de ces données brutes, ainsi que les moyennes issues de ces séries temporelles après une étape de filtration (méthode EMD), afin d'enlever l'influence des fluctuations contenues dans ces jeux de données hautes fréquences (voir chapitre 2, paragraphe 4.2.1) .

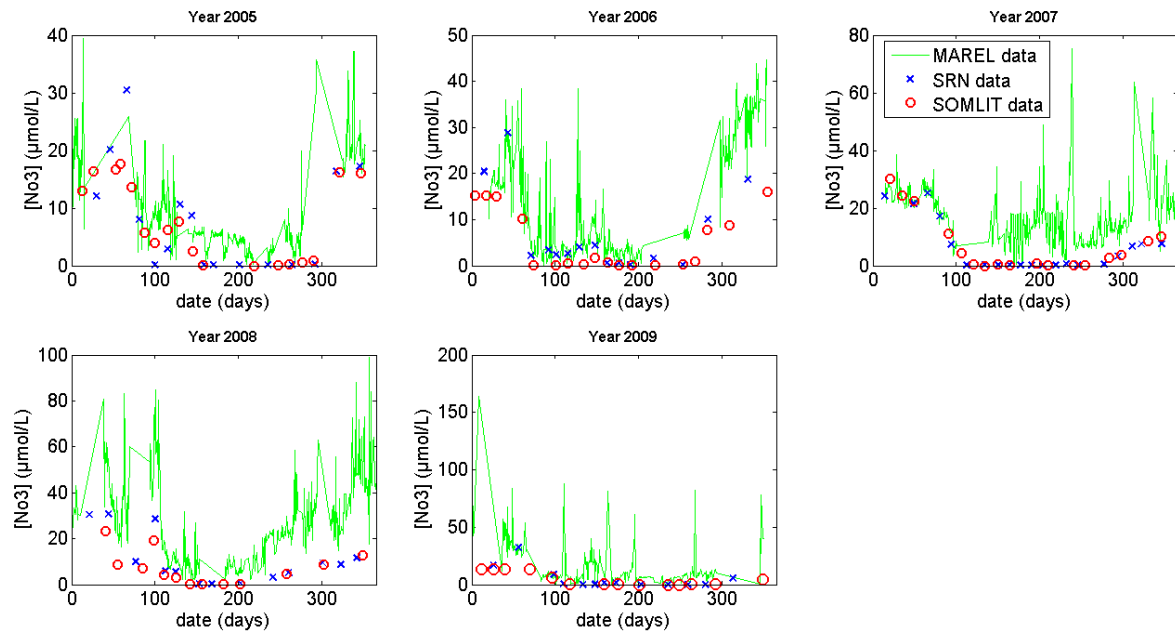


Figure 3-4. Comparaison des suivis basses fréquences (SOMLIT et SRN) et hautes fréquences MAREL Carnot, pour les nitrates entre 2005 et 2009.

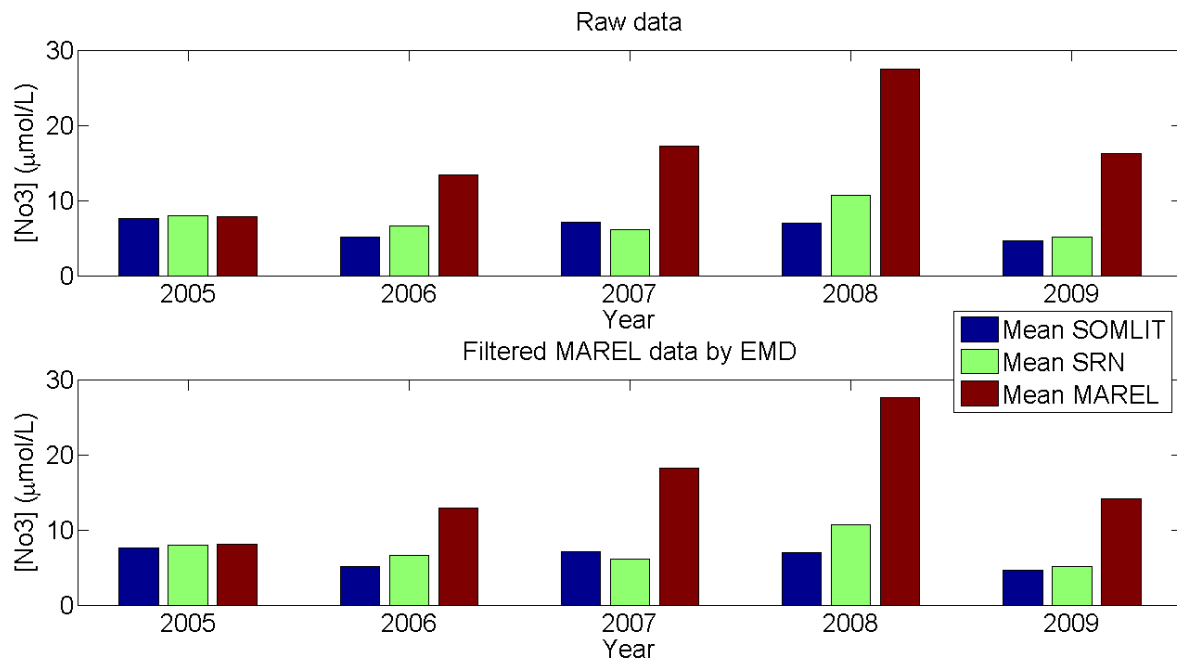


Figure 3-5. Comparaison des moyennes des suivis basses fréquences et hautes fréquences, pour les nitrates entre 2005 et 2009. En bas, les moyennes sont calculées à partir des données brutes et en haut, à partir des données filtrées par l'intermédiaire de la méthode EMD.

Il y a une mauvaise concordance entre les données brutes hautes fréquences et basses fréquences pour les nitrates (voir figure 3-4) et les phosphates (voir figure 3-5), contrairement aux données brutes de silicates (voir figure 3-8) où la concordance semble un peu plus importante. D'une manière générale, les données SRN semblent plus proches des données MAREL Carnot que les données SOMLIT; dans tous les cas, les concentrations en sels nutritifs MAREL Carnot restent plus importantes que les concentrations enregistrées par les réseaux basses fréquences. Cette tendance se confirme alors qu'on regarde les figures en lien avec les comparaisons de moyennes annuelles (voir figures 3-5, 3-7, 3-9), à part dans le cas des silicates pour l'année 2005 (voir figure 3-9). Toutes les autres moyennes annuelles MAREL sont supérieures, même dans les cas des moyennes issues des données filtrées par la méthode EMD qui

enlève l'influence des fluctuations qui pourraient tirer ces moyennes vers le haut. Les moyennes annuelles SOMLIT ont une tendance générale à être plus proches des moyennes SRN que des moyennes MAREL, à part entre 2005 et 2008 pour les phosphates (voir figure 3-7) où les moyennes annuelles SRN sont plus proches de celles de MAREL Carnot.

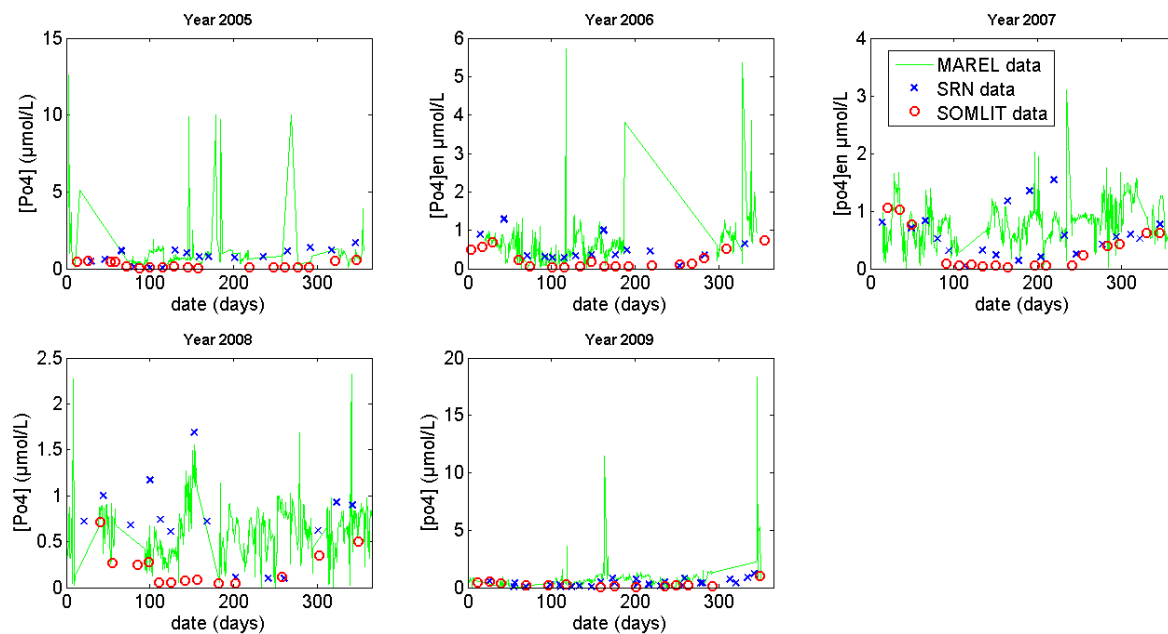


Figure 3-6. Comparaison des suivis basses fréquences (SOMLIT et SRN) et hautes fréquences MAREL Carnot, pour les phosphates entre 2005 et 2009.

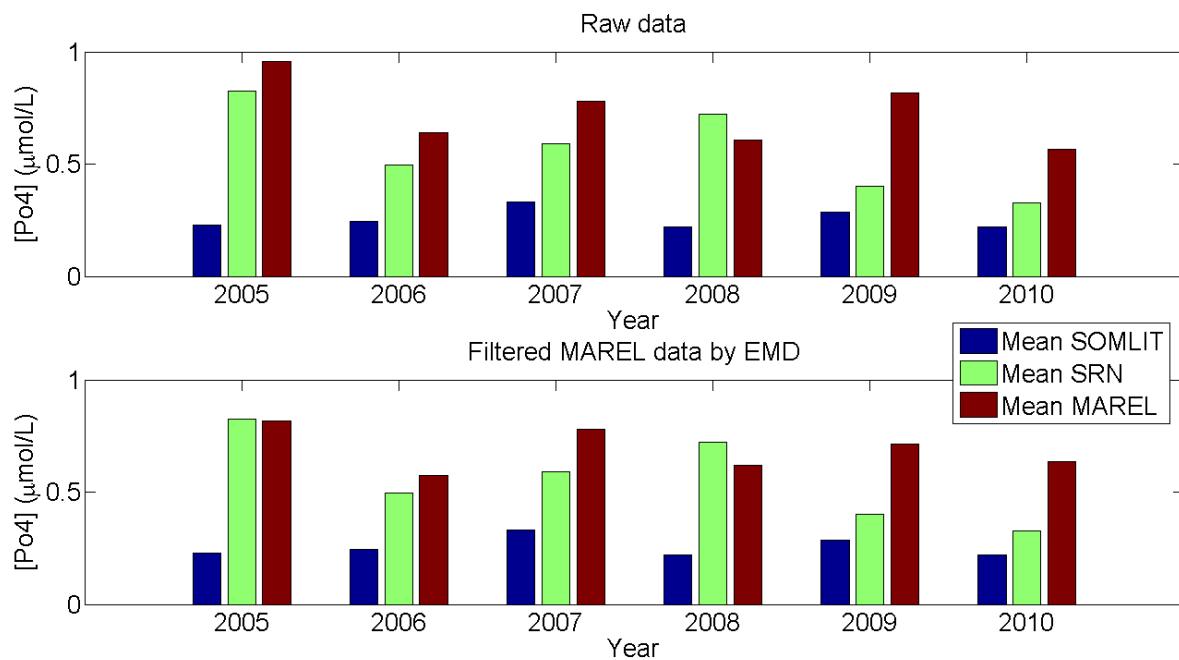


Figure 3-7. Comparaison des moyennes des suivis basses fréquences et hautes fréquences, pour les phosphates entre 2005 et 2010. En bas, les moyennes sont calculées à partir des données brutes et en haut, à partir des données filtrées par l'intermédiaire de la méthode EMD.

Pour résumer, les moyennes annuelles MAREL Carnot sont généralement les plus élevées. On pourrait trouver des explications à ce phénomène parmi les quatre facteurs suivants :

- Le système automatisé MAREL Carnot est situé à la sortie de la rade du port de Boulogne-sur-Mer (voir chapitre 1 , paragraphe 2.2.1), or cette zone géographique est fortement soumise à l'influence des pollutions anthropiques.
- Les capteurs du système MAREL Carnot effectuent des mesures *in situ*, contrairement aux réseaux basses fréquences où les analyses sont effectuées en laboratoire, il pourrait donc y avoir un biais systématique.
- L'existence d'une hétérogénéité à petites échelle dans la zone côtière de Boulogne-sur-Mer.

- Les valeurs extrêmes fortes, présentes dans les fluctuations enregistrées par notre système haute fréquence, auraient tendance à tirer les moyennes vers le haut.

On peut voir que les moyennes MAREL Carnot filtrées sont moins importantes que les moyennes non filtrées, mais ces moyennes délestées de leurs fluctuations restent tout de même plus importantes que les moyennes issues des réseaux basses fréquences. On peut donc invalider l'hypothèse de l'influence des données hautes fréquences sur les moyennes MAREL Carnot. La raison principale des concentrations plus élevées est sans doute liée aux activités anthropiques, mais nous verrons cela plus en détail dans le prochain paragraphe. La différence entre les moyennes SOMLIT et SRN laisse penser qu'il y a bien une hétérogénéité à petite échelle, mais il ne faut pas oublier que chaque année, il y a une inter-calibration du réseau SOMLIT, or il n'y a pas inter-calibration SRN/SOMLIT. Il est donc difficile de pouvoir tirer des conclusions avec certitude et de savoir si cet écart entre leurs moyennes est lié à une différence de protocole, à l'hétérogénéité à petite échelle, ou à une combinaison de ces deux facteurs.

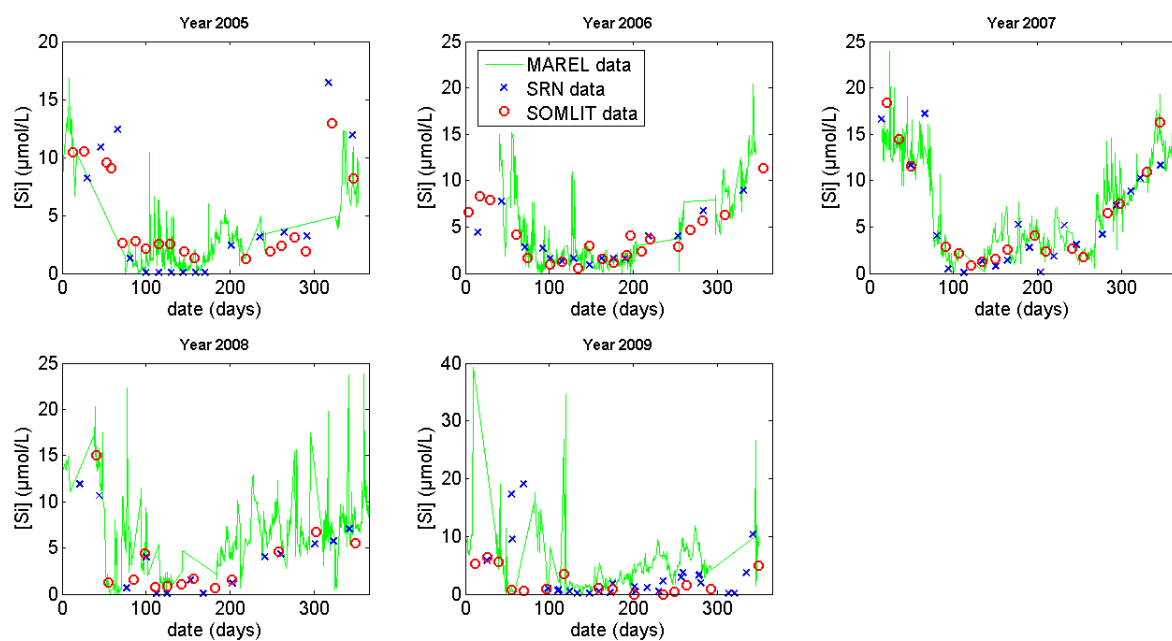


Figure 3-8. Comparaison des suivis basses fréquences (SOMLIT et SRN) et hautes fréquences MAREL Carnot, pour les silicates entre 2005 et 2009.

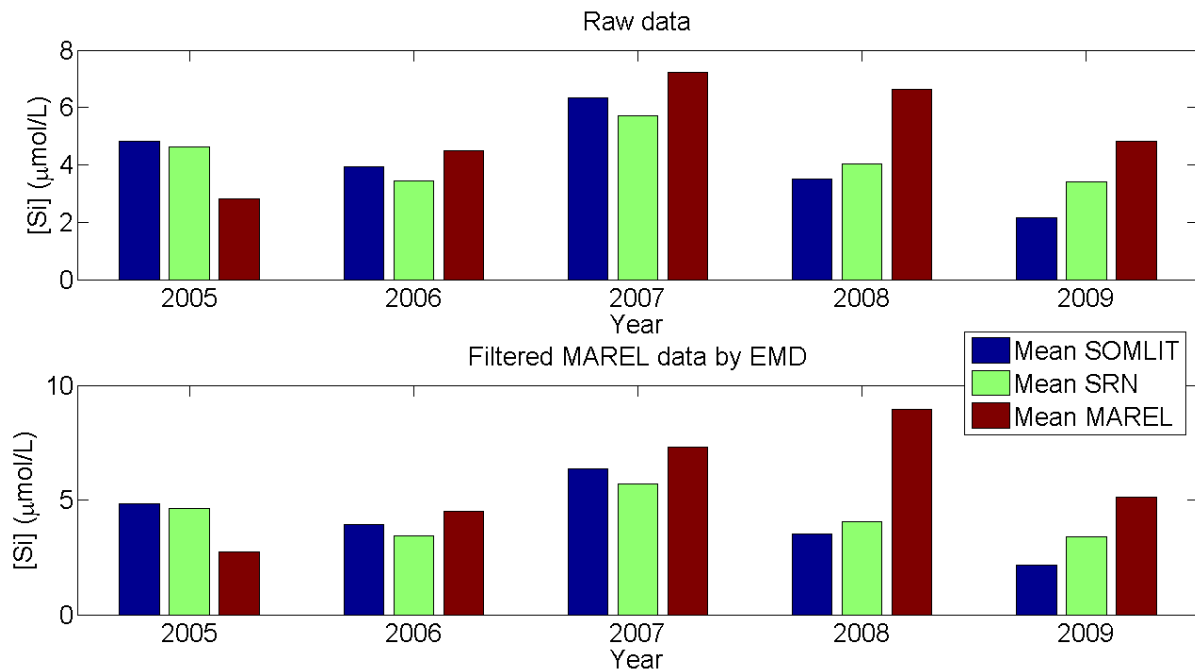


Figure 3-9. Comparaison des moyennes des suivis basses fréquences SRN et hautes fréquences MAREL Carnot, pour les silicates entre 2005 et 2009. En bas, les moyennes sont calculées à partir des données brutes et en haut, à partir des données filtrées par l'intermédiaire de la méthode EMD.

2.2.2 Influence potentielle du Barrage Marguet

Nous venons de voir que les jeux de données de sels nutritifs provenant de MAREL Carnot comportaient un nombre important de valeurs manquantes, et que ce système était localisé dans une zone fortement influencée par les pollutions anthropiques. Or dans le chapitre 1 Matériel et méthodes au paragraphe 5.1, on avait mis en avant que ce type pollution impactait principalement les concentrations en sels nutritifs, et dans la conclusion du chapitre 2 (voir paragraphe 6.) que cet impact anthropique était en constante augmentation. Cette conclusion rappelait aussi que l'un des principaux vecteurs de cette pollution anthropique était les apports d'eau douce acheminée par les fleuves. Or, dans le chapitre 1 paragraphe 5, on avait montré

que le barrage Marguet contrôlait l'arrivée de ces eaux douces dans la rade du port de Boulogne-sur-Mer et dans le paragraphe 5.3, on mentionnait que la salinité était généralement utilisée comme un traceur des masses d'eau douce. Pour cette étude, nous utiliserons les données de hauteur d'ouverture de la porte du barrage Marguet qui nous ont été cordialement transmises par les services portuaires, en passant par l'intermédiaire de la Région Nord-Pas-de-Calais. Il est important de noter qu'aucun débitmètre n'est installé à la sortie de ce barrage et qu'il y n'a pas de relation précise entre la hauteur d'ouverture de la porte et la quantité d'eau douce relarguée dans la rade du port. Nous utiliserons donc la salinité estimée au point MAREL Carnot comme un indicateur supplémentaire.

Cette étude a pour but d'évaluer l'impact potentiel que pourrait avoir l'ouverture des portes du barrage Marguet sur les séries temporelles de sels nutritifs enregistrées par MAREL Carnot. Dans ce cadre-là, nous avons arbitrairement pris en compte les hauteurs d'ouverture de porte de l'année 2009, pour les mettre en parallèle avec les concentrations de sels nutritifs et la salinité (proxy de l'eau douce) relevés par MAREL Carnot (voir figures 3-10, 3-11, 3-12). Dans tous les cas, on remarque le lien étroit qu'il y a entre les périodes d'ouverture du barrage et les chutes brutales de la salinité. Ces périodes vont très probablement être à l'origine d'apport de pollution anthropique dans notre zone d'étude et, par conséquent, faire augmenter les concentrations en sels nutritifs. Il est très intéressant de voir que ces périodes d'apport d'eau douce coïncident quasi-systématiquement avec les périodes de valeurs manquantes dans les séries temporelles de sels nutritifs et cela quel que soit le paramètre concerné (nitrates, silicates et phosphates).

Boulogne-sur-Mer a la plus grande densité de population et est la deuxième ville la plus peuplée du département Pas-de-Calais, on peut donc aisément imaginer que les rejets anthropiques sont importants et que la Liane est l'un des principaux vecteurs de transition de cette pollution vers la mer. On peut donc supposer qu'il y a un problème de mesures avec les fortes concentrations en sels nutritifs au niveau du

système MAREL Carnot. Mais la cause exacte de ces valeurs manquantes reste indéterminée et l'on ne peut que faire des suppositions, comme par exemple : la gamme de valeurs que mesure les capteurs serait trop faible pour détecter les fortes concentrations en sels nutritifs ; le prétraitement des données pourrait considérer des valeurs trop importantes comme fausses ... On pourrait encore trouver moult raisons, mais il faut surtout retenir que les périodes manquantes sont très vraisemblablement liées à la pollution anthropique, qui est elle-même contrôlée par l'ouverture des portes du barrage Marguet.

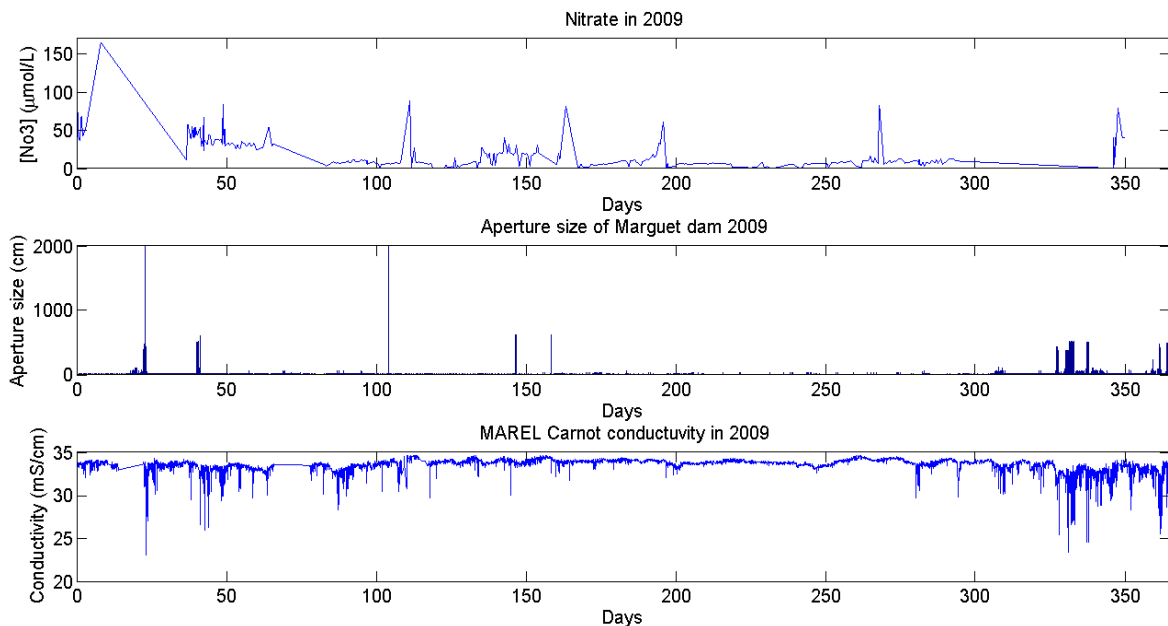


Figure 3-10. En haut : données brutes des nitrates MAREL Carnot en 2009 ; au milieu : hauteur d'ouverture de la porte du barrage Marguet en 2009 ; en bas : données brutes de conductivité (salinité) MAREL Carnot en 2009.

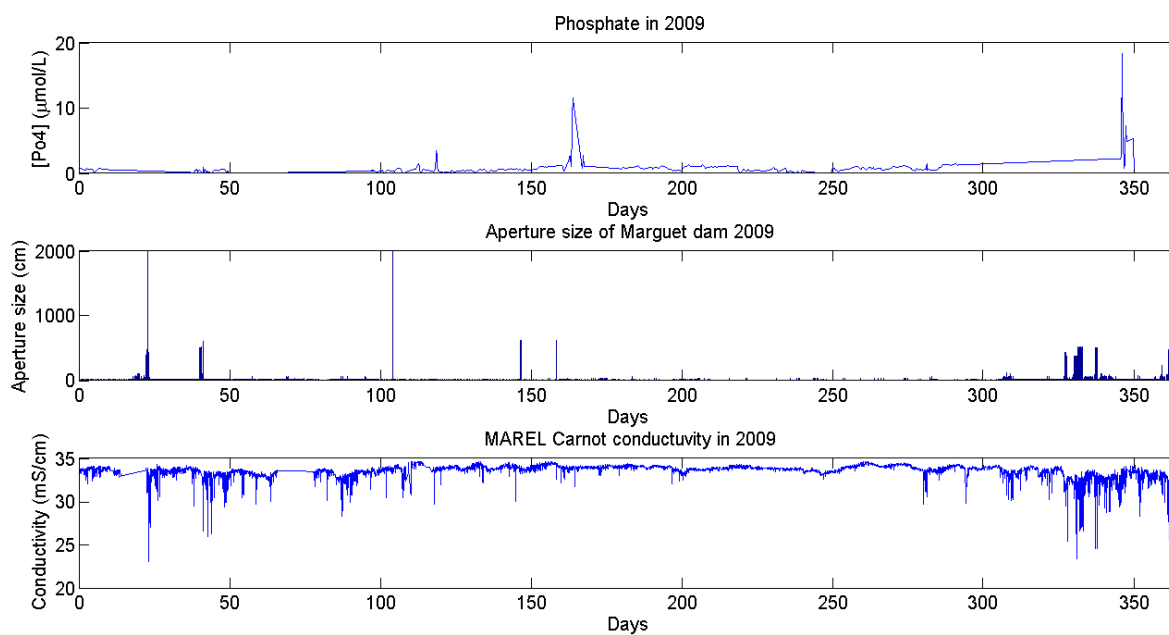


Figure 3-11. En haut : données brutes des phosphates MAREL Carnot en 2009 ; au milieu : hauteur d'ouverture de la porte du barrage Marguet en 2009 ; en bas : données brutes de conductivité (salinité) MAREL Carnot en 2009.

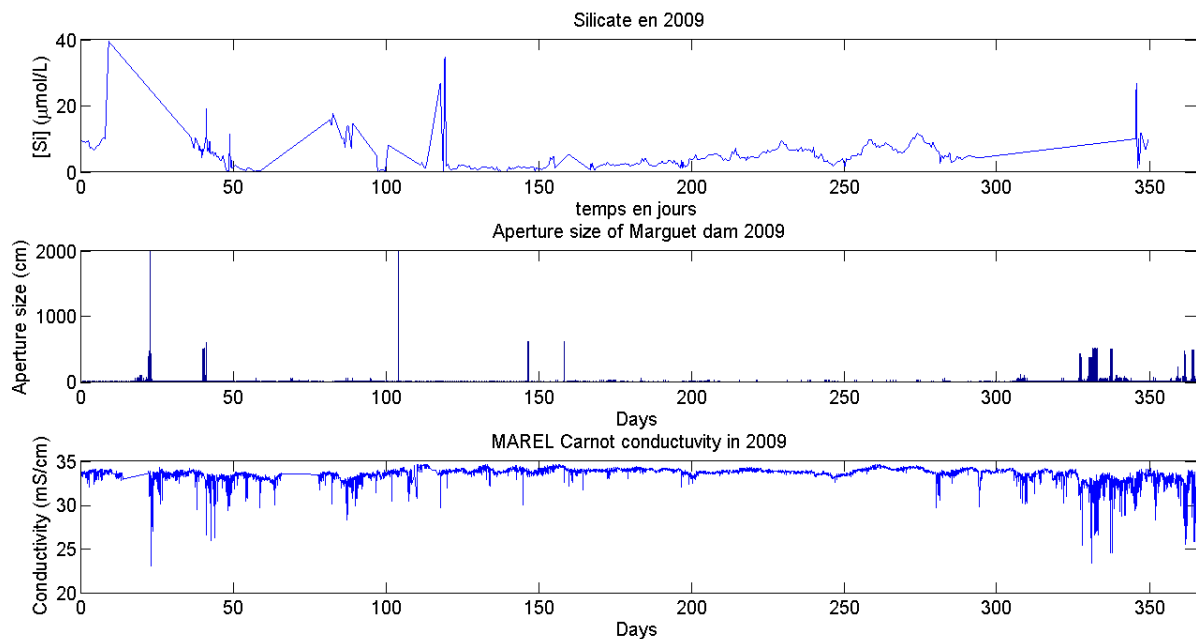


Figure 3-12. En haut : données brutes des silicates MAREL Carnot en 2009 ; au milieu : hauteur d'ouverture de la porte du barrage Marguet en 2009 ; en bas : données brutes de conductivité (salinité) MAREL Carnot en 2009.

3 Comparaison des réseaux hautes fréquences

3.1 Présentation des données

La figure 3-13 présente les données brutes de MAREL Carnot et de la SeaBird Roscoff pour le paramètre de température entre 2005 et 2011. La série temporelle MAREL a été coupée pour que les périodes analysées soient les mêmes. La fréquence d'échantillonnage de la Seabird Roscoff est de 10 minutes, alors que celle de MAREL est deux fois plus grande, avec un pas de temps de 20 minutes. Ces deux jeux de données brutes mettent en avant le comportement stochastique et les variations à multi-échelle présentes dans les données hautes fréquences. La figure 3-14 présente la climatologie des températures MAREL Carnot et de la SeaBird Roscoff entre 2005 et

2011 (voir figure 3-13). Cette figure suit le même protocole que la figure 2-2 présentée dans le chapitre précédent, donc pour plus de détails sur sa construction, se référer au paragraphe 2.1 du chapitre 2. Le mouillage installé dans la baie de Morlaix n'est pas équipé de capteur de fluorescence, il nous sera donc impossible de comparer la dynamique de production primaire de cette zone géographique et celle de Boulogne-sur-Mer.

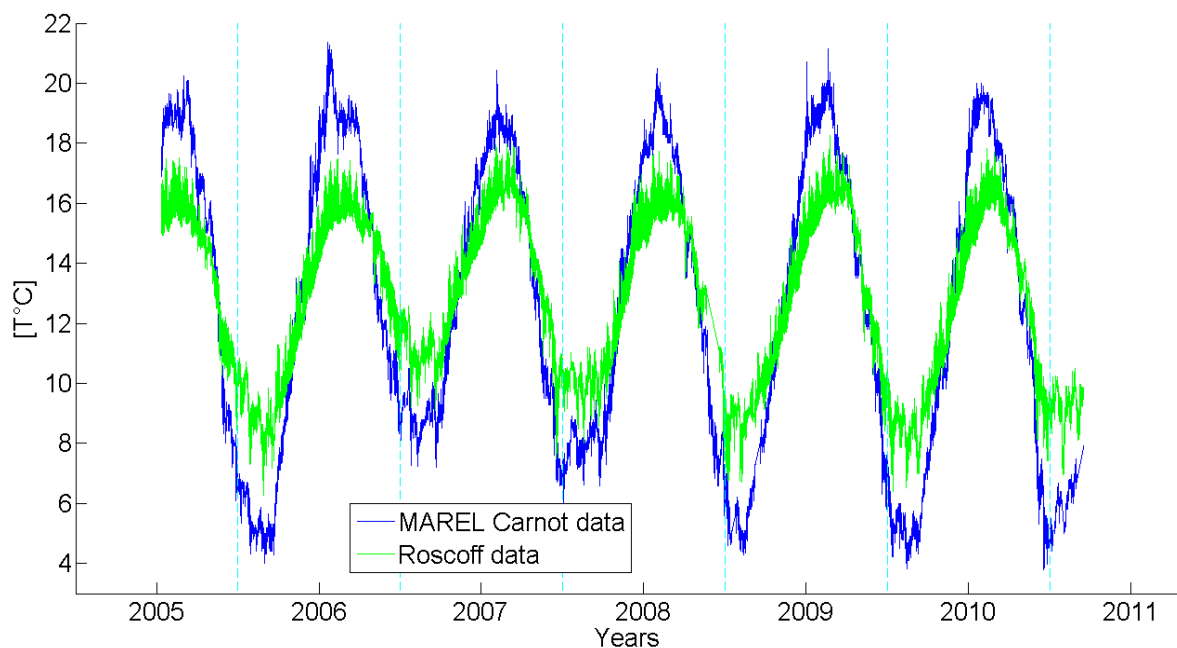


Figure 3-13. Données brutes de températures MAREL Carnot (en bleu) et Roscoff (en vert) entre 2005 et 2011. Les lignes pointillées verticales (en cyan) séparent chaque année.

On voit sur la figure 3-14 que les températures minimales et maximales en Manche occidentale (Roscoff) sont respectivement de 9°C et 16°C, ce qui nous donne un delta de température de 7°C. Alors que le delta de température pour MAREL Carnot est plus élevé avec une valeur de 12°C, et ses températures minimales et maximales sont comprises entre 6°C et 18°C. Dans les deux cas, les courbes sont assez lisses, à

Boulogne-sur-Mer les étés sont plus chauds et les hivers plus froids, il y a un croisement des courbes aux jours 150 et 300, soit le 1^{er} Juin et le 10 Septembre environ. L'intensité plus modérée de la dynamique interannuelle des températures présentes à Roscoff montre que nous avons un climat plus tempéré que dans la zone de Boulogne-sur-Mer. La figure 3-15 présente la PDF de la différence des températures entre Boulogne-sur-Mer et Roscoff. On voit que cet écart est majoritairement réparti sur une plage comprise entre -4°C et 4°C, avec un pic vers les -2°C.

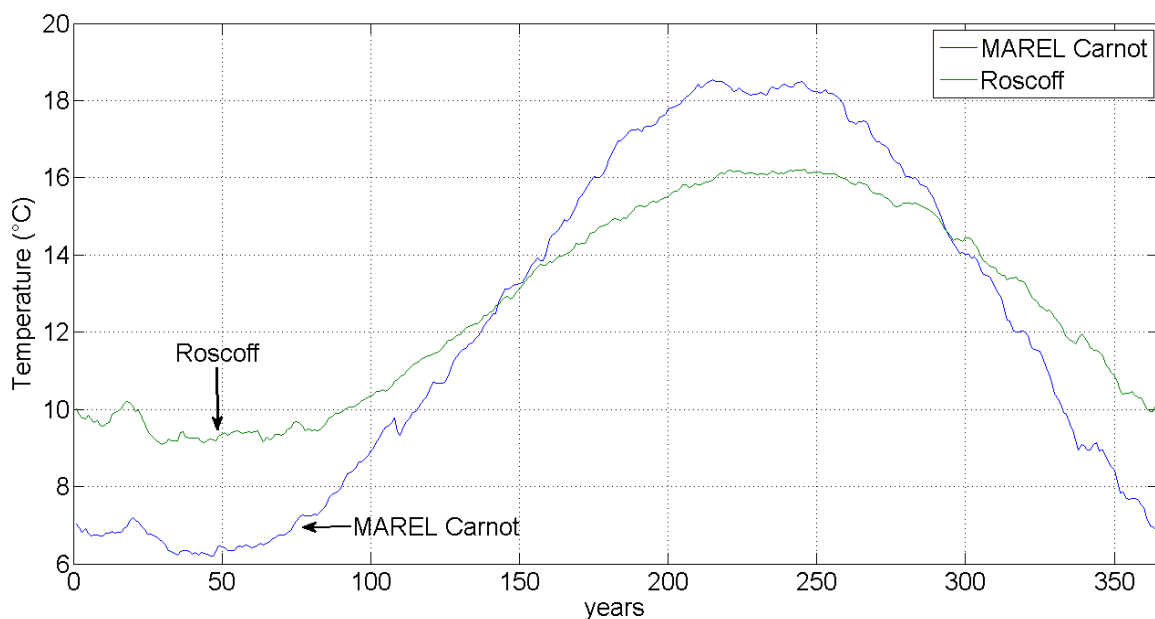


Figure 3-14. Climatologie des températures Roscoff (en vert) et MAREL Carnot (en bleu) entre 2005 et 2011.

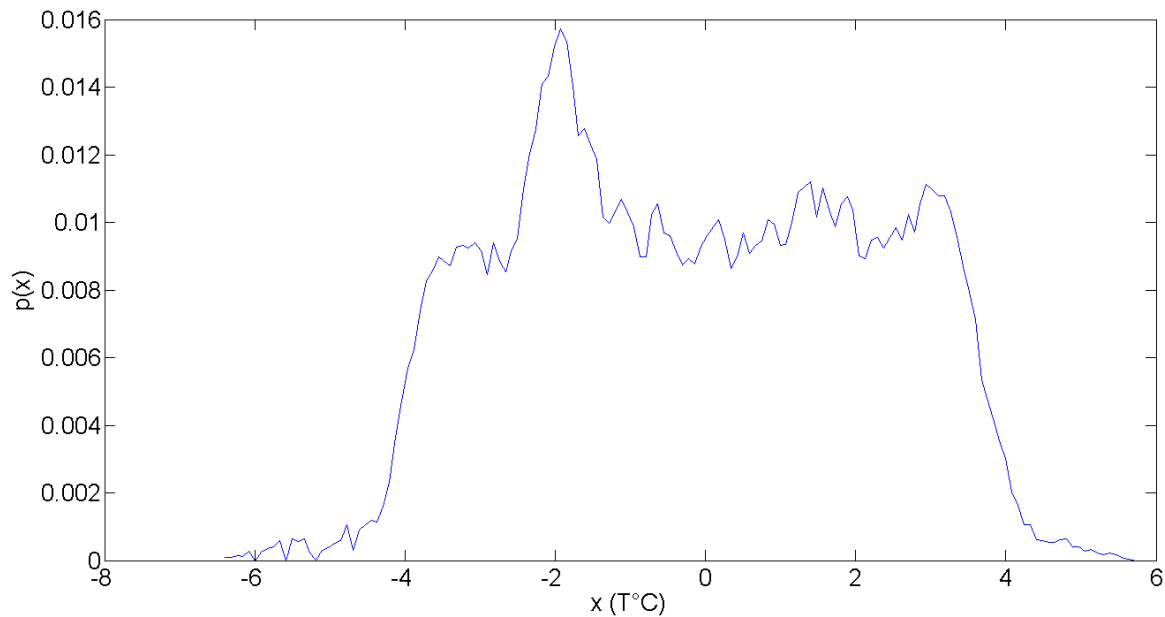


Figure 3-15. Fonction de densité de probabilité de la différence entre les températures de Boulogne-sur-Mer et Roscoff.

3.2 Etude spectrale

Nous avons comme objectif de comparer les séries temporelles hautes fréquence entre la Manche occidentale et orientale. Dans ce cadre-là, nous réaliserons une analyse co-spectrale dans les paragraphes suivants. Cette méthode utilise la transformée de Fourier comme pour les analyses spectrales classiques. Ces deux méthodes partagent donc la même problématique : les bases de données utilisées doivent avoir un pas de temps équidistant (voir chapitre 1 ; paragraphe 6.3.2). Dans cette optique, les deux jeux de données qui seront utilisés dans l'analyse du co-spectre doivent aussi avoir une fréquence d'échantillonnage identique, ce qui va être problématique dans le cas de notre comparaison, car la balise MAREL Carnot effectue un enregistrement toutes les 20 minutes, alors que la SeaBird Roscoff effectue la même opération toutes les 10 minutes. Afin de résoudre ce problème, nous avons dégradé la résolution temporelle des températures relevées à Roscoff, pour que la fréquence de cette dernière concorde avec celle de MAREL Carnot (20 minutes). Cette

dégradation temporelle a été effectuée par l'intermédiaire d'une méthode d'interpolation linéaire classique. La figure 3-16 met en évidence la PDF de la différence entre les pas de temps (non-équidistants) pour MAREL Carnot (en rouge) et pour la SeaBird Roscoff (en bleu). Cette figure est construite avec les différences temporelles entre les éléments adjacents de la manière suivante : $[X(2)-X(1) \ X(3)-X(2) \dots X(n)-X(n-1)]$. On peut voir que les pas de temps irréguliers chutent de manière très rapide pour les données MAREL Carnot, et en ce qui concerne Roscoff, ces irrégularités sont de petites tailles et en nombre limité. Ce qui nous permet donc d'utiliser la méthode FFT (après interpolation des deux séries temporelles) sans que cela n'apporte un biais significatif à nos analyses sur la structuration dynamique de ces bases de données.

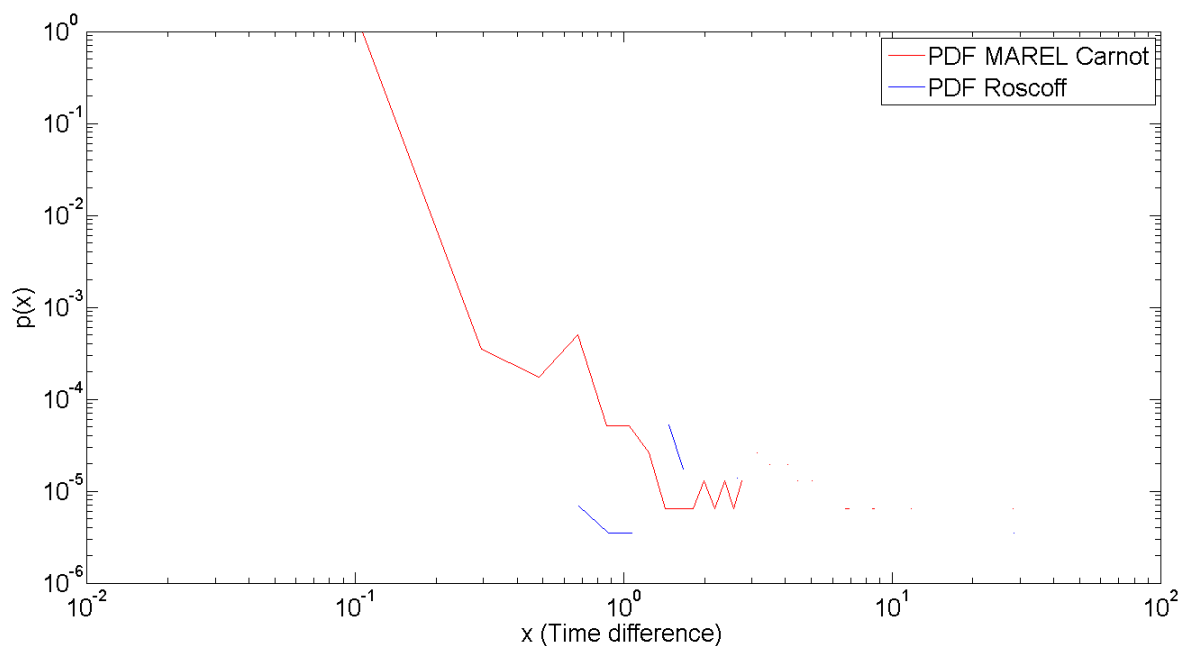


Figure 3-16. Fonction de densité de probabilité en échelle log-log pour les données de températures MAREL Carnot et la Seabird Roscoff.

Les analyses spectrales utilisant la transformée de Fourier (voir équation (19)), sont couramment utilisées dans les différents domaines des sciences océanographiques depuis plusieurs décennies (Legendre and Legendre, 2012, Platt and Denman, 1975, Seuront et al., 2002, Seuront et al., 1999, Seuront et al., 1996a, Seuront et al., 1996b, Winder and Cloern, 2010, Lefebvre and Lagache, 2008, Grant et al., 1962). Il est important de rappeler que l'exposant issu des pentes spectrales peut être interprété : quand il est proche de 0, il s'agit d'un bruit, quand il est aux abords de 2, nous sommes en présence d'un mouvement brownien et pour $5/3$ c'est le signe de la turbulence (Huang et al., 2008). On peut voir sur la figure 3-17 que les 3 pentes spectrales sont proches de $5/3$, bien que la pente de Roscoff (en rouge) soit un peu plus éloignée que les deux autres. Une valeur proche de $5/3$ est attendue pour la turbulence pleinement développée (Kolmogorov, 1941, Obukhov, 1941, Frisch, 1995). En continuant l'observation de notre figure 3-17, on constate également certains pics : les pics notés (1) sur la figure sont des sous-harmoniques de la marée (12h) ; le pic marqué (2) correspond à la marée, (3) au cycle journalier et (4) au cycle annuel.

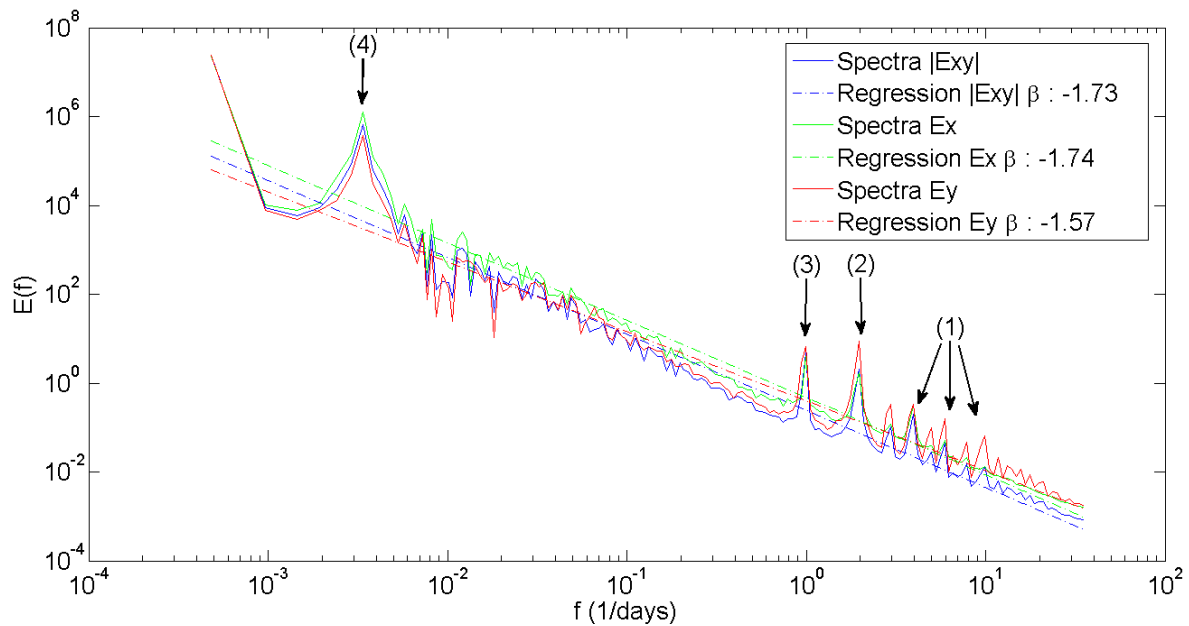


Figure 3-17. Spectre de puissance (méthode FFT) pour les températures MAREL Carnot (Ex), la Seabird Roscoff (Ey) et leurs normes (Exy). Plusieurs pics sont visibles : (1) pour les sous-harmoniques de la marée, (2) pour la marée, (3) pour le jour et (4) pour l'année.

3.2.1 Co-spectre

Le but de la figure 3-18 est de caractériser l'échelle de la transition d'énergie entre les masses d'eau présentes à Roscoff et à Boulogne-sur-Mer. Pour cela nous utilisons la méthode des co-spectres décrite dans le chapitre 1 paragraphe 6.4.1 (voir équation (24)). Nous avons vu que lorsque R était égal à 1, il y avait une relation linéaire entre les deux paramètres (Lumley, 2007). Quand R est faible (décroissant vers 0) les deux séries n'ont plus de relation statistique (indépendance). Selon la figure 3-18, pour les basses fréquences, pour 172 jours et au-delà, la corrélation est très forte entre les séries. Ensuite celle-ci décroît, de 172 à 11 jours environ pour les hautes fréquences, au-delà de 11 jours la corrélation est faible, et atteint un plateau.

La vitesse moyenne des courants de surface dans notre zone d'étude est d'environ 0,5m/s (Danilo, 2009, Nøst and Isachsen, 2003), et la distance entre nos 2

systèmes automatisés est d'environ 650km. Par conséquent, l'échelle temporelle correspondante est d'environ 15 jours (650000/0,5), cette échelle caractéristique ($T_0=15j$) de décorrélation entre les deux séries temporelles est compatible avec le pattern représenté en figure 3-18 : les échelles $T > T_0$ présentent des liens statistiques entre les séries de plus en plus marqués, et pour les deux séries, elles deviennent indépendantes.

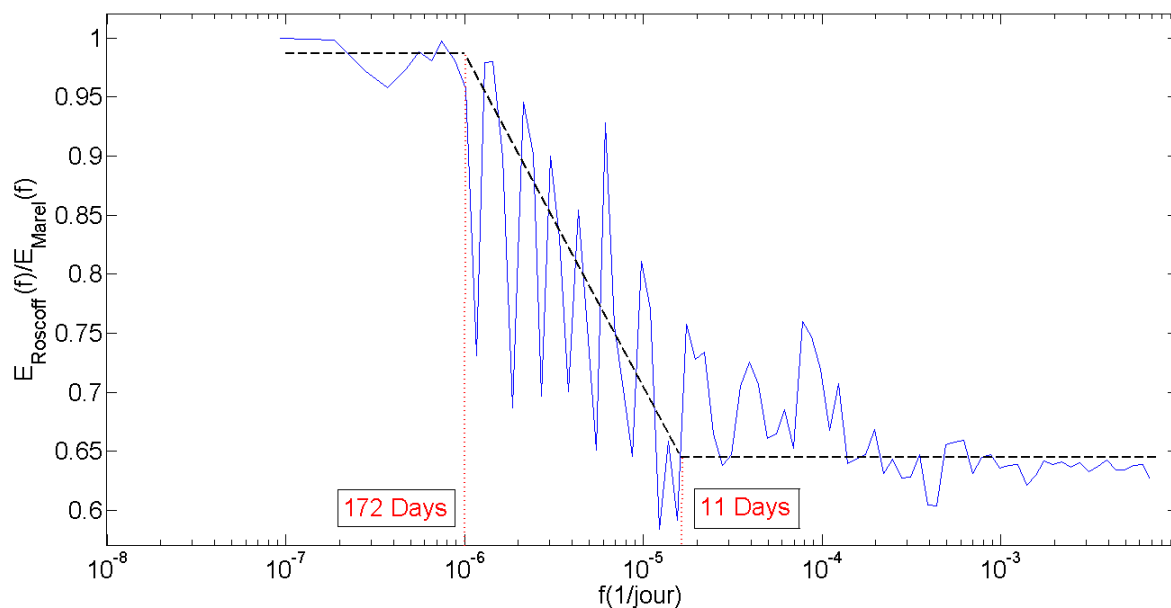


Figure 3-18. Co-spectre utilisant la méthode FFT, en échelle semi-log (axe des x), pour les séries temporelles MAREL Carnot et Roscoff.

3.3 Méthode TDIC

Dans ce paragraphe, nous allons utiliser la méthode TDIC (voir chapitre 1 ; paragraphe 6.4.2) pour essayer de déterminer les corrélations en fonction d'échelles caractéristiques au niveau des températures de surface entre la Manche occidentale et la Manche orientale. Malheureusement, l'utilisation de cette méthode est extrêmement gourmande en mémoire vive, la RAM disponible sur un ordinateur "classique" ne nous permet pas d'utiliser nos séries temporelles avec leur périodicité

de 20 minutes. Dans ce cadre-là, nous avons dû dégrader le pas de temps de nos deux jeux de données à l'échelle de la journée. La figure 3-19 montre les nouvelles séries temporelles qui ont été utilisées pour cette analyse. Un fois la méthode TDIC appliquée sur nos deux séries temporelles dégradées, il en résulte 7 fenêtres de corrélation TDIC, avec des échelles caractéristiques comprises entre 3 et 736 jours : 3,6 jours (voir figure 3-20), 8,3 jours (voir figure 3-21), 17,95 jours (voir figure 3-22), 40,16 jours (voir figure 3-23), 151,5 jours (voir figure 3-24), 388 jours (voir figure 3-25) et 735 jours (voir figure 3-26).

On voit apparaître un pattern pour les quatre premiers graphes TDIC (jusqu'au jour 40) : pour chacune de ces années, il y a un patch bleu durant leurs périodes estivales et un rouge durant leurs périodes hivernales. Ceci qui signifie qu'il y a une corrélation en hiver et une anti-corrélation en été. Quand l'on regarde vers le haut du triangle pour ces 4 fenêtres, il ne semble pas y avoir de corrélation pour le jour 3, contrairement aux jours 8, 18 et 40 où l'on voit apparaître dans chaque cas un gros patch orange relativement homogène.

La méthode TDIC est utilisée et interprétée de la manière suivante : plus on se déplace vers la pointe supérieure du triangle, plus on regarde les corrélations avec un décalage temporel. Donc l'apparition de ces patches oranges semble confirmer l'interaction des températures de surface de Roscoff et des les températures de surface de Boulogne-sur-Mer, avec une période de temps comprise entre 11 et 172 jours. Nous n'avons pas la base de la fenêtre du jour 151, mais quand on regarde dans la partie haute du triangle, on peut voir un patch bleu (pas de corrélation) dans la partie gauche et un patch de corrélation rouge dans la partie droite. Il s'agit peut-être du signe de la fin du changement de régime, où les températures de Roscoff commencent à ne plus avoir d'influence sur celles de Boulogne-sur-Mer.

Sur la fenêtre qui correspond au jour 388, on remarque un important patch de corrélation rouge situé à gauche ; quant à la partie droite, elle est principalement bleue. Ce pattern pourrait être lié à l'amplitude du signal de température entre les

zones qui sont assez proches pour les années 2007 et 2008 (voir figure 3-13). Au contraire, en 2009 et 2011, les amplitudes de température MAREL Carnot sont plus importantes que celles relevées à Roscoff, ce qui pourrait expliquer cette décorrélation, car pour cette fenêtre nous sommes à l'échelle de l'année. Le dernier graphique TDIC (voir figure 3-26) comporte trop de valeurs manquantes, il est donc impossible de l'interpréter.

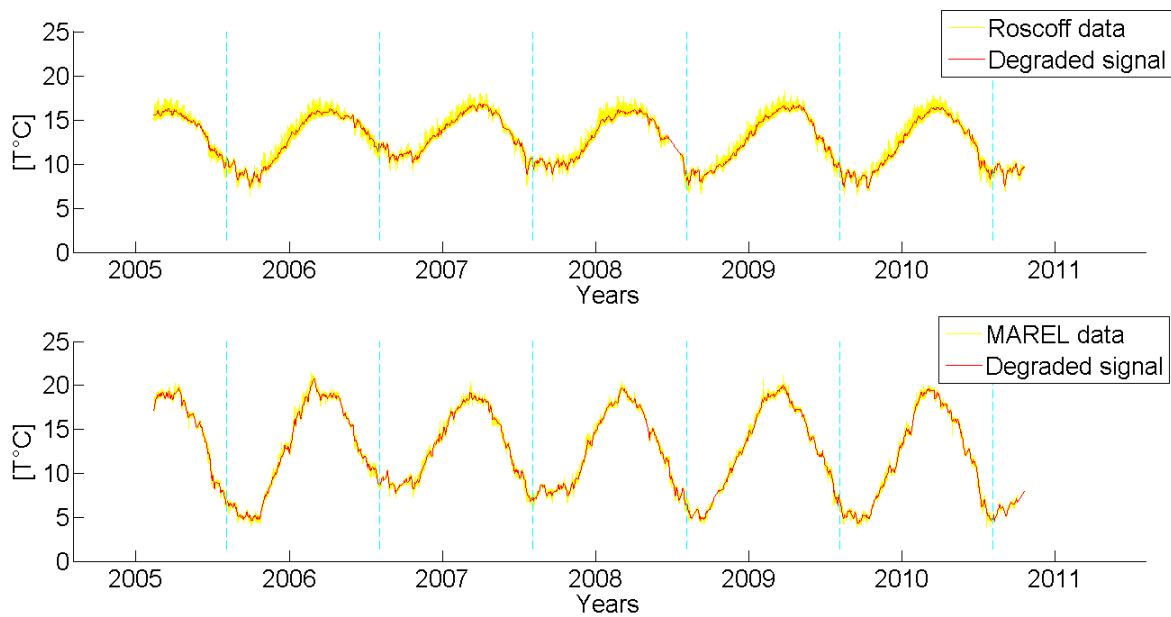


Figure 3-19. Dégradation des données brutes MAREL Carnot et Roscoff à l'échelle de la journée.

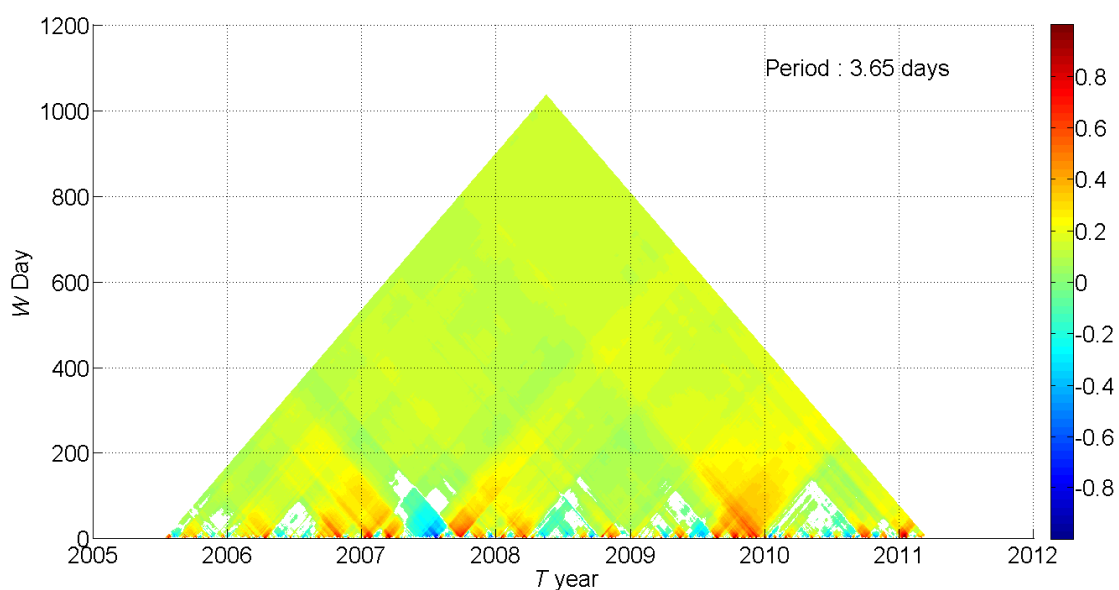


Figure 3-20. Corrélation croisée entre MAREL Carnot et la Seabird Roscoff pour les températures, utilisant la méthode TDIC. Avec une période caractéristique de 3,65 jours.

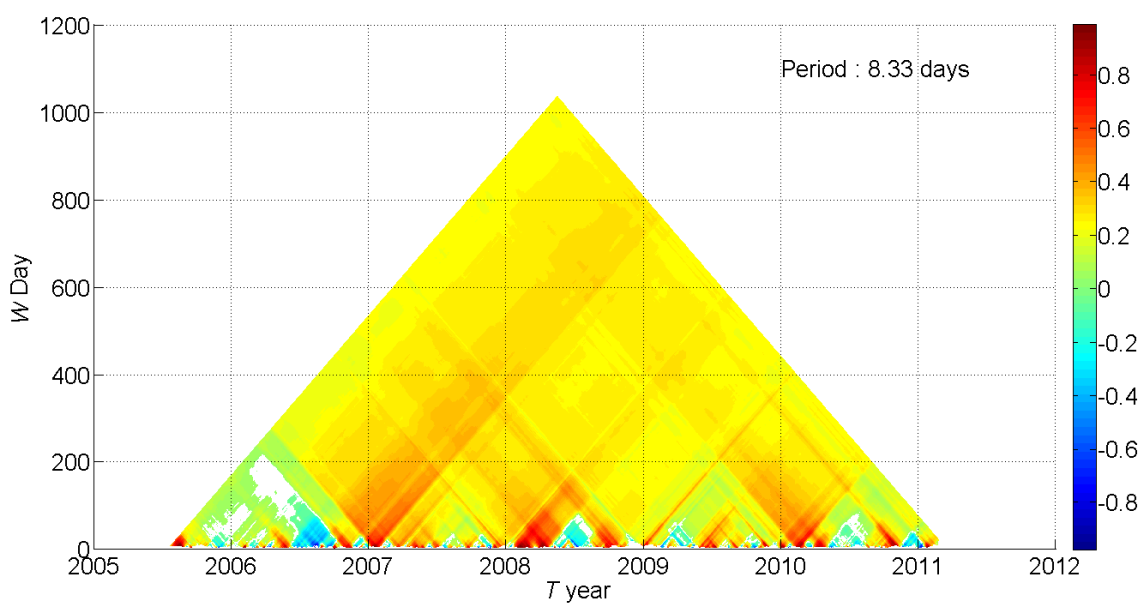


Figure 3-21. Corrélation croisée entre MAREL Carnot et la Seabird Roscoff pour les températures, utilisant la méthode TDIC. Avec une période caractéristique de 8,33 jours.

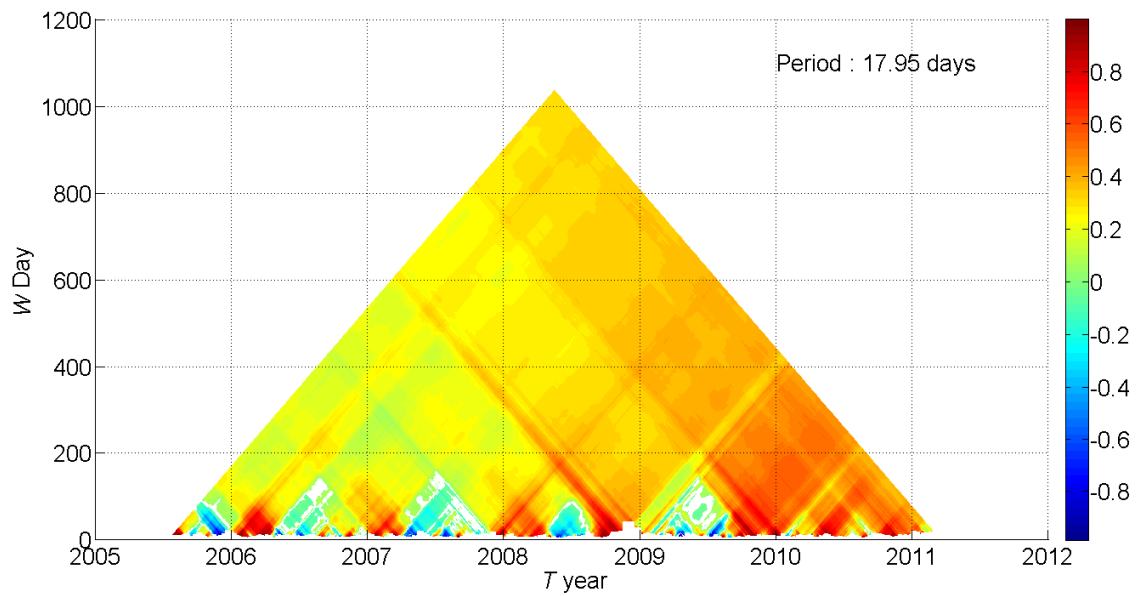


Figure 3-22. Corrélacion croisé entre MAREL Carnot et la Seabird Roscoff pour les températures, utilisant la méthode TDIC. Avec une période caractéristique de 17,95 jours.

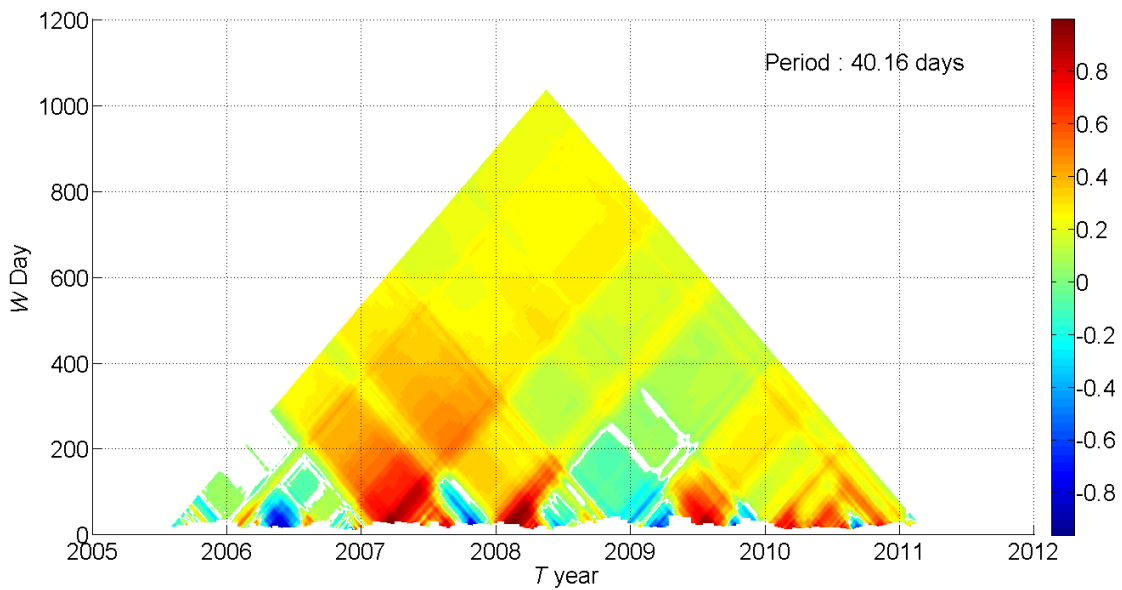


Figure 3-23. Corrélacion croisé entre MAREL Carnot et la Seabird Roscoff pour les températures, utilisant la méthode TDIC. Avec une période caractéristique de 40,16 jours.

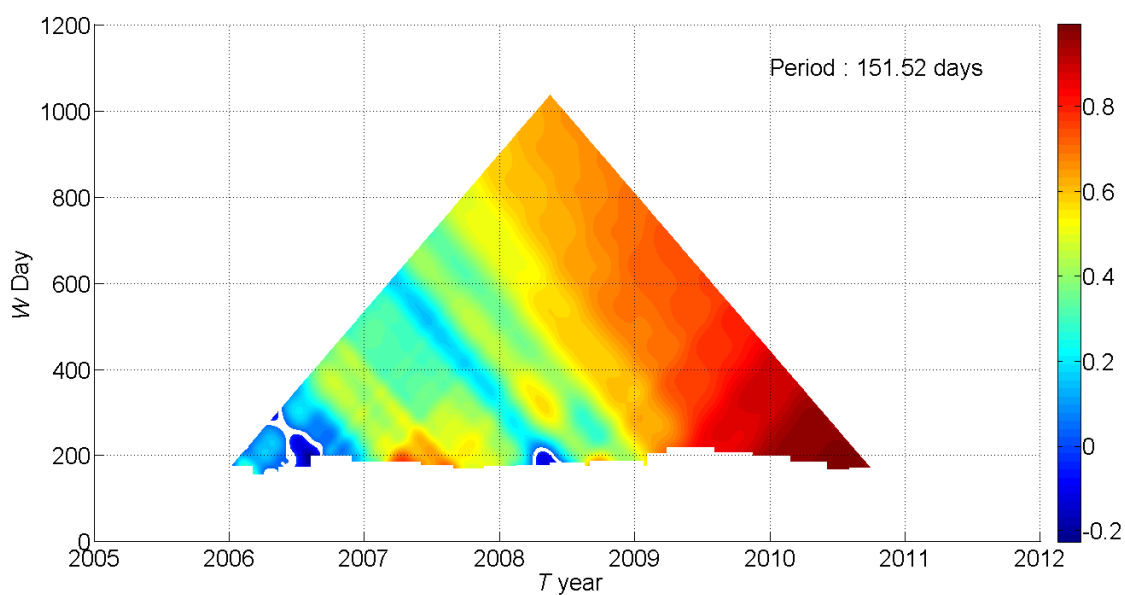


Figure 3-24. Corrélation croisé entre MAREL Carnot et la Seabird Roscoff pour les températures, utilisant la méthode TDIC. Avec une période caractéristique de 151,52 jours.

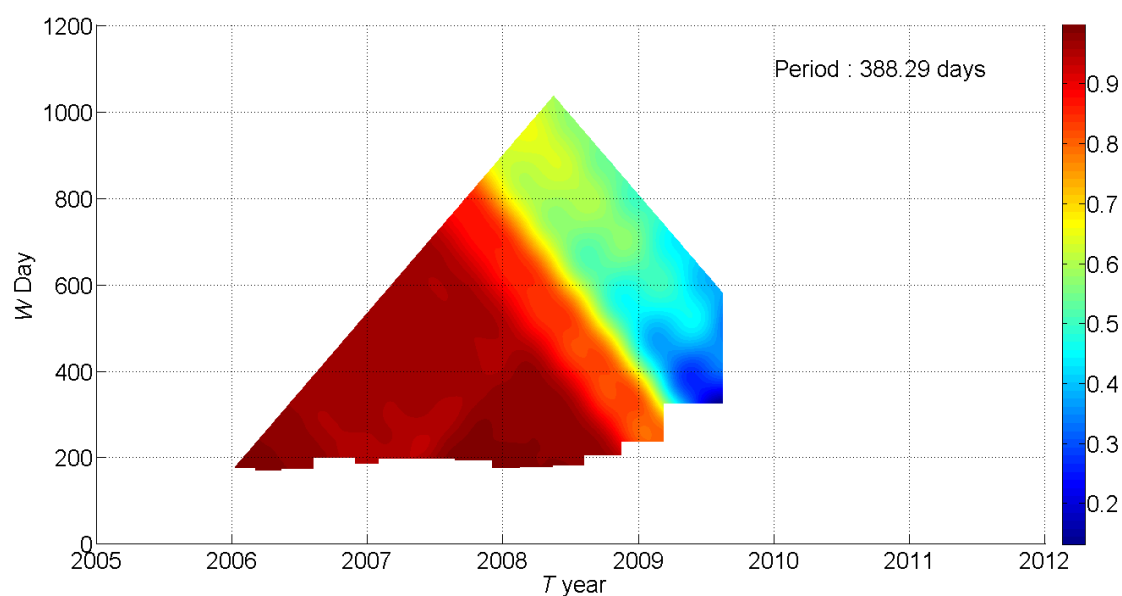


Figure 3-25. Corrélation croisé entre MAREL Carnot et la Seabird Roscoff pour les températures, utilisant la méthode TDIC. Avec une période caractéristique de 388,29 jours.

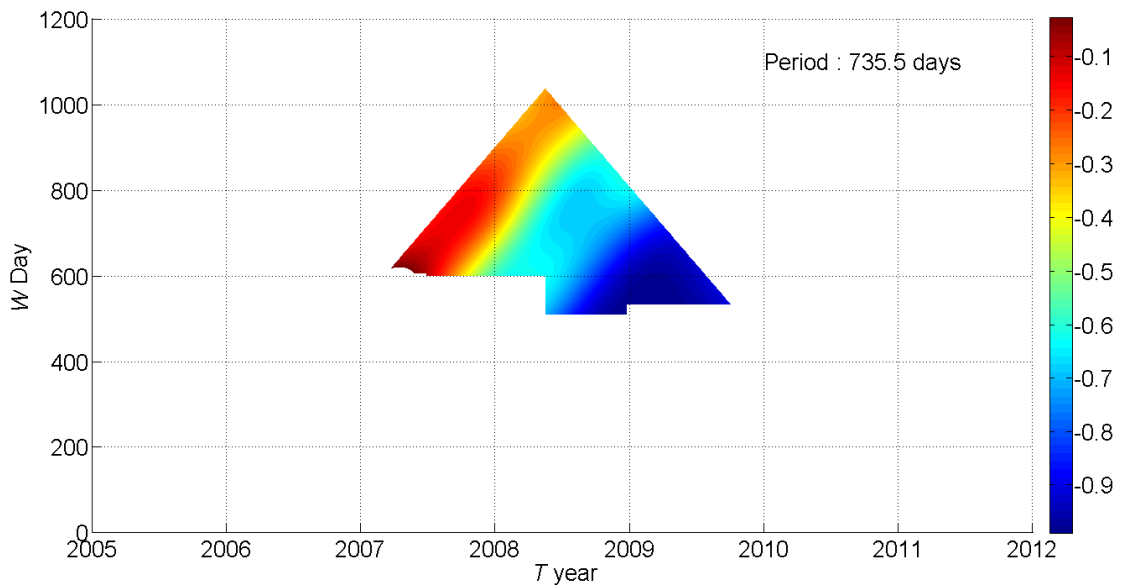


Figure 3-26. Corrélation croisé entre MAREL Carnot et la Seabird Roscoff pour les températures, utilisant la méthode TDIC. Avec une période caractéristique de 735,5 jours.

3.4 Comparaison spectrale des températures en différentes région du globe.

3.4.1 Présentation des données

La figure 3-27 présente les données brutes issues de 4 systèmes automatisés, dont deux sont localisés en Manche occidentale, un en Manche orientale et le dernier est localisé dans un détroit au Canada (voir chapitre 1, paragraphe 3.4). La base de données MAREL Carnot ici utilisée s'étend sur une période comprise entre 2004 et 2010 (voir figure 3-27, courbe bleue), pour MAREL Iroise entre 2004 et 2011 (voir figure 3-27, courbe verte), pour la SeaBird Roscoff entre 2005 et 2011 (voir figure 3-27, courbe rouge) et pour le mouillage East Node entre 2006 et 2010 (voir figure 3-27, courbe magenta). L'amplitude des variations interannuelles de températures est plus importante pour la base de données MAREL Carnot, contrairement à la base de

données Venus où ces variations sont très faibles. Graphiquement, les variations d'amplitude de MAREL Iroise et de la SeaBird Roscoff sont assez proches, ce phénomène est dû à leur proximité géographique. Les séries temporelles de ce deux systèmes ne sont pas non plus exactement similaires, mais nous verrons cela plus en détail dans le prochain paragraphe, où les quatre séries temporelles que nous avons ici présenté sont utilisées pour réaliser une étude spectrale.

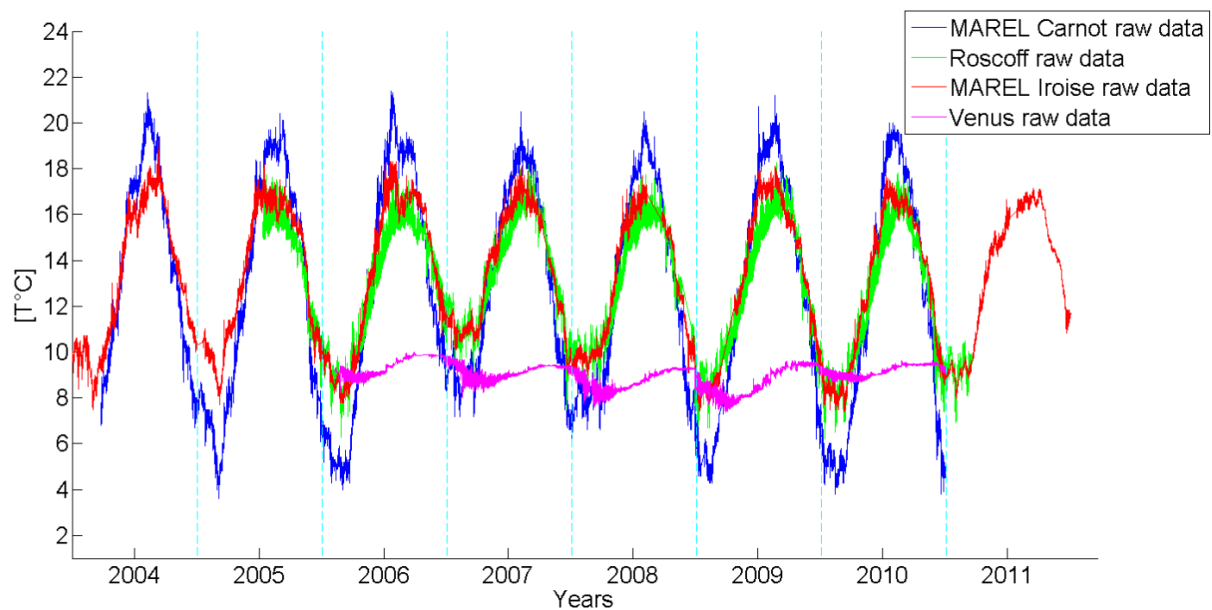


Figure 3-27. Données brutes de températures pour les systèmes automatisés suivants : MAREL Carnot (en bleu), Seabird Roscoff (en vert), MAREL Iroise (en rouge) et Venus (en magenta).

3.4.2 Etude spectrale

Nous avons vu à plusieurs reprises qu'une pente spectrale proche de $5/3$ était le signe de la turbulence pleinement développée (Kolmogorov, 1941, Obukhov, 1941, Frisch, 1995). Or sur la figure 3-28, dans le cas de MAREL Carnot et MAREL Iroise, avec respectivement 1,72 et 1,71, ces deux pentes spectrales sont proches de $5/3$. Il est

important de noter que ces deux systèmes sont équipés d'un flotteur, par conséquent leur profondeur d'échantillonnages reste identique quel que soit le niveau de la marée. Les pentes des deux autres systèmes automatisés (SeaBird Roscoff et East Node Venus) s'éloignent du signal de la turbulence pleinement développée ; cet éloignement de la valeur référence 5/3 pourrait avoir un lien avec les deux facteurs suivants :

- Les capteurs de l'East Node et la Seabird Roscoff, contrairement aux deux systèmes MAREL, ne sont pas installés sur un flotteur, mais directement sur un mouillage. Leur profondeur d'échantillonnage est donc dépendante du marnage.
- Ces deux mouillages sont situés dans des zones géographiques assez enclavées, le réseaux Venus mesure des données dans un détroit (voir chapitre 1, paragraphe 3.4) et la Seabird Roscoff est installée à mi-chemin entre la pointe de la ville de Roscoff et l'île de Batz (voir voir figure 1-6, chapitre 1, paragraphe 3.2).

Dans le but de tester ces deux hypothèses, il serait intéressant d'avoir à disposition deux autres bases de données de températures enregistrées à long terme ; la première provenant d'un mouillage dans une zone "géographiquement ouverte" et la deuxième provenant d'un système automatisé équipé d'un flotteur, installé dans une zone géographiquement enclavée. Nous pourrions alors plus facilement quantifier l'impact qu'apportent les milieux enclavés et les systèmes automatisés (sans flotteur) sur les analyses spectrales. On peut aussi constater qu'il n'y a aucune différence entre le β estimé avec la méthode EMD (voir figure 3-28) et le β estimé avec la méthode FFT (voir figure 3-17), au niveau de la Seabird Roscoff et MAREL Carnot.

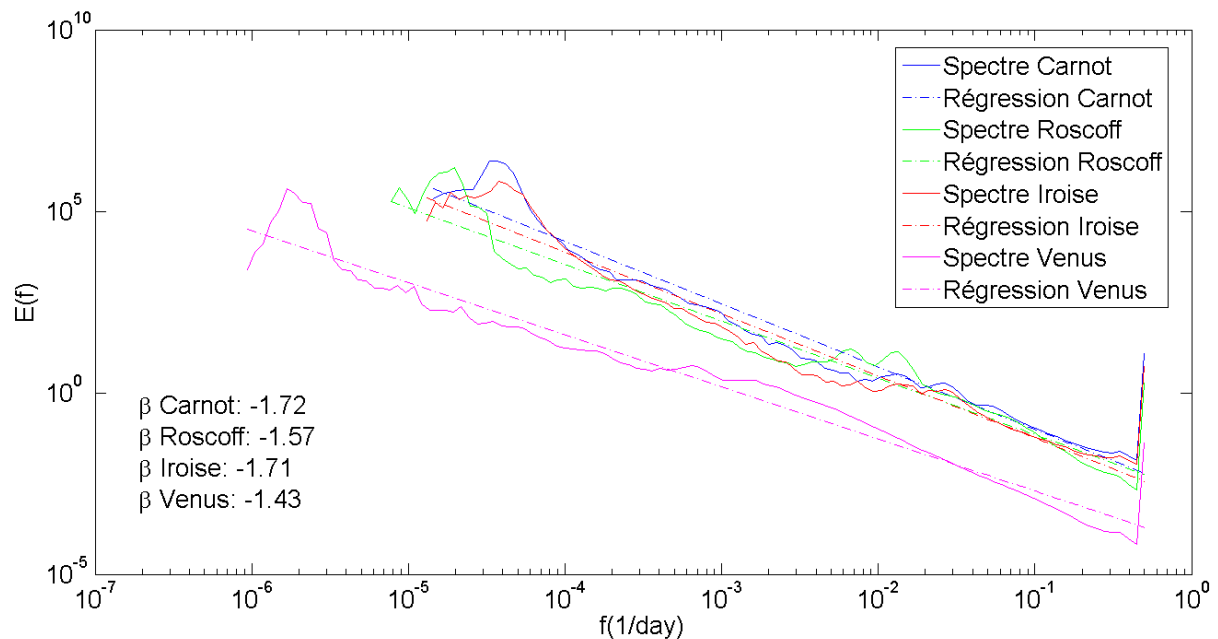


Figure 3-28. Analyses spectrales sur les températures issues des systèmes automatisés suivants : MAREL Carnot (en bleu), Seabird Roscoff (en vert), MAREL Iroise (en rouge) et Venus (en magenta).

4 Conclusion

La comparaison entre les réseaux de surveillance du littoral basses et hautes fréquences dans la zone de Boulogne-sur mer montre qu'il y a une bonne concordance pour les séries temporelles de températures et le proxy de la biomasse phytoplanctonique. Cette concordance est beaucoup moins bonne pour l'oxygène dissous, les nitrates et les phosphates, mais elle semble légèrement meilleure pour les silicates. Ces manques de concordance pourraient être liés à une hétérogénéité à petite échelle dans notre zone d'étude. En ce qui concerne la comparaison des réseaux basses fréquences SOMLIT et SRN, il faut garder à l'esprit qu'aucune inter-calibration n'est réalisée (contrairement à l'ensemble du réseau SOMLIT). Les importantes périodes de valeurs manquantes dans les jeux de données de sels nutritifs enregistrés par MAREL Carnot sont probablement liées à la pollution anthropique. Les apports de

cette pollution sont contrôlés par l'ouverture des portes du barrage Marguet. Or les fortes concentrations en sels nutritifs semblent avoir un impact négatif sur l'enregistrement de ces séries temporelles relevées par la balise MAREL Carnot.

Nous avons vu par l'intermédiaire de l'analyse spectrale (voir paragraphe 3.2) que les principaux forçages qui semblaient impacter les températures de surface devaient partager un lien étroit avec les cycles suivants : jours/nuits, marées, saisons et grandes marées. Ces types de forçages sont majoritairement contrôlés par les mécanismes astronomiques. L'analyse du co-spectre, réalisée dans le paragraphe 3.2.1, met en évidence les relations qu'ont les températures de surface de Roscoff avec les températures de surface présentes à Boulogne-sur-Mer. Nous avons aussi montré que cette corrélation aurait une échelle caractéristique de 15 jours, avec une transition entre 11 et 172 jours. Cette échelle de temps est validée par l'analyse TDIC, avec laquelle nous avons trouvé de bonnes corrélations entre nos deux systèmes automatisés durant cette période.

Les conclusions de l'analyse du co-spectre et celles de la méthode TDIC qui est très performante, convergent vers la même direction, et nous ont permis de mettre en avant le lien qui existe entre la Manche occidentale et orientale, ainsi que de caractériser son échelle de transition.

Nous pouvons désormais poser l'hypothèse suivante : comme la circulation remonte globalement vers le détroit, allant de l'Atlantique vers la Mer du Nord, les températures de surface présentes à Roscoff influencent les températures de surface à Boulogne-sur-Mer, avec un temps caractéristique de 15 jours correspond à une durée de transport moyen.

Nous aurions besoin de bases de données comportant plus d'années pour affiner notre analyse. Il serait aussi intéressant de pouvoir utiliser un calculateur, afin d'utiliser la méthode TDIC sur nos séries temporelles sans avoir besoin de les dégrader. De cette manière, nous pourrions avoir plus de fenêtres TDIC, ce qui, potentiellement, nous permettrait de rétrécir notre période de transition entre nos deux zones

géographiques. Par conséquent, avec plus d'années disponibles et une puissance de calcul accrue, nous disposerions d'une période d'impact affinée, qui pourrait éventuellement être utilisée dans des modèles numériques d'écologie côtière appliqués à la Manche. Nous avons vu dans la fenêtre TDIC proche de l'échelle annuelle (voir figure 3-25) que les années 2009 et 2010 semblaient avoir une corrélation moins importante que les autres années prises en compte dans cette étude. Nous pourrions considérer dans nos travaux futurs, si cette décorrélation pourrait avoir un lien avec les variations de la NAO (North Atlantic Oscillations), car une étude récente, utilisant les données provenant de MAREL Iroise (Tréguer et al., 2014), indique qu'il semble y avoir un lien entre les températures de surface présentes dans la rade de Brest et les fluctuations de cette NAO.

La comparaison de la structuration dynamique de quatre jeux de données de températures issues de systèmes automatisés hautes fréquence, par l'intermédiaire d'analyses spectrales (méthode EMD-HSA), montre que les pentes β provenant des deux systèmes MAREL étaient proches du signal de la turbulence pleinement développée. Au contraire les deux autres systèmes automatisés étudiés (Venus et la SeaBird Roscoff) qui ont des pentes β plus éloignées de $5/3$, alors que dans la figure 3-27 les séries temporelles de MAREL Iroise et Roscoff semblaient proches. Cette différence entre les pentes spectrales pourrait être due à la conception des systèmes, car les deux balises MAREL ont leurs capteurs installés sur des flotteurs, contrairement aux deux autres systèmes qui ont leurs capteurs installés sur des mouillages fixes. Cette différence pourrait aussi avoir un lien avec la topographie des zones d'étude. Afin de voir si les pentes spectrales de températures sont soumises à l'impact de la géographie ou du marnage, il faudrait disposer de deux autres bases de données hautes fréquences : la première issue d'une zone géographique ouverte où les capteurs seraient installés sur un mouillage ; et la deuxième provenant d'une zone géographique enclavée où les capteurs seraient installés sur un flotteur. La méthode spectrale utilisée (EMD-HSA ou FFT) sur les jeux de données de températures MAREL

Carnot et la Seabird ne semble pas avoir d'impact sur les pentes spectrales α , nous avons montré par l'intermédiaire de la figure 3-16 que les périodes manquantes n'étaient pas assez importantes pour avoir une réelle influence sur ces analyses.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

L'objectif principal de cette thèse était d'étudier des séries temporelles biogéochimiques à long terme issues des systèmes automatisés hautes fréquences. Nous avons principalement analysé des jeux de données provenant d'écosystèmes côtiers marins qui possèdent des dynamiques non-linéaires. Ces séries comportent de nombreuses interactions et couplages à multi-échelles, nous avons donc du trouver et développer des outils méthodologiques capables de décrire l'intensité et de prendre en compte leur caractère aléatoire. Nous avons surtout essayé de comprendre la dynamique de la production primaire et les interactions qu'il pourrait y avoir avec les autres paramètres enregistrés par ces systèmes hautes fréquences : concentrations en sels nutritifs, températures, salinité, P.A.R. Afin de décrypter et caractériser ce type de dynamique non-linéaire, nous nous sommes concentrés sur l'étude des fluctuations. Pour cela, nous avons tout d'abord utilisé des méthodes d'analyses classiques : quantiles, PDF, ACP, temps de retour et climatologie. Puis nous avons utilisé la méthode EMD pour séparer les hautes fréquences des basses fréquences dans nos séries temporelles, et couplé cette méthode avec la transformée de Hilbert pour effectuer des analyses spectrales, moins sensibles aux manques de données. La méthode EMD a aussi été utilisée dans les analyses TDIC, qui nous ont permis au niveau des données de température dans la Manche, de caractériser les changements de régime plus finement qu'avec des méthodes de cross-corrélation classiques (co-spectres).

Cette thèse est constituée de trois grands chapitres et de plusieurs annexes :

- **Chapitre 1.** Matériels et méthodes
- **Chapitre 2.** Analyses de la dynamique de la fluorescence
- **Chapitre 3.** Comparaison des réseaux de surveillance en milieu côtier

Nous avons commencé par considérer la dynamique interannuelle des séries temporelles de températures et de fluorescences issues de la balise MAREL Carnot. Cette étude nous a permis de mettre en avant le fait que les jeux de données de la fluorescence comportent beaucoup plus de fluctuations que ceux des températures. Puis on a étudié les extrêmes de ces deux paramètres par l'intermédiaire des quantiles. On a pu voir que les extrêmes de température semblaient avoir un comportement stochastique, contrairement à la fluorescence qui semble posséder un pattern avec un cycle de trois ans pour le quantile 10 et un cycle de deux ans pour le quantile 90. L'analyse multi-variée a montré que la fluorescence dans cette zone d'étude (Manche orientale) était principalement dépendante de la température, puis de la lumière et des phosphates. On a vérifié ces dépendances au cas par cas, ce qui nous a permis de mettre en avant la tendance à l'augmentation d'intensité des blooms quand les températures diminuaient ; ce résultat s'oppose à une précédente hypothèse, formulée dans une étude menée dans la Manche (Gómez and Souissi, 2008).

Par l'intermédiaire des PDF, nous avons montré que les fit en loi de puissance étaient meilleurs que ceux en loi log-normale pour approximer les données de production primaire. Les études spectrales ont montré que le coefficient de pente β de température était proche du signe de la turbulence pleinement développée et que pour la fluorescence son β était proche des valeurs précédemment constatées dans cette zone (Zongo and Schmitt, 2011b). Le coefficient α issu des PDF peut être utilisé comme un indicateur de la structuration statistique et le coefficient β provenant des études spectrales comme un indicateur de la structuration dynamique. Dans ce cadre-là, nous avons aussi testé les relations de ces coefficients avec différents paramètres et nous avons réussi à dégager plusieurs lois, néanmoins leur universalité reste à prouver. Nous avons également montré que les périodes de bloom n'étaient pas lisses, mais possédaient de fortes fluctuations visibles par les temps de retour mais également en filtrant les données avec la méthode EMD ; ce comportement s'apparente aux

séismogrammes observés lors des tremblements de terre : par analogie avec ceux-ci on pourrait parler de bloom d'intensité 8 sur l'échelle Derot-Schmitt.

Pour conclure ce chapitre, nous avons mis en avant que la stratification pourrait être l'un des mécanismes responsable de la tendance de l'augmentation de l'intensité des blooms quand la température diminue.

Le chapitre 3 débute par une comparaison entre le système automatisé hautes fréquences MAREL Carnot et deux programmes de surveillance du littoral (SOMLIT et SRN) dans la même zone géographique. Bien qu'il y ait une bonne concordance entre certains paramètres (températures et production primaire), cette comparaison sous-entend qu'il pourrait y avoir une hétérogénéité à petite échelle. Nous avons ensuite mené une étude qualitative sur l'impact de l'ouverture des portes du barrage Marguet, ce qui nous a permis d'expliquer en partie le nombre important de valeurs manquantes dans les séries temporelles de sels nutritifs relevées par la balise MAREL Carnot. Puis nous avons essayé de quantifier l'échelle de transition des températures de surface entre la Manche occidentale et orientale, par l'intermédiaire de deux méthodes de cross-corrélation, l'une classique et l'autre assez novatrice se basant sur la méthode EMD. La méthode TDIC a l'avantage de créer des fenêtres de corrélation en fonction de plusieurs temps caractéristiques ; cependant, bien que l'analyse de ces deux séries temporelles à long terme avec cette méthode soit plus précise, ces résultats convergent tout de même avec ceux de l'analyse du co-spectre. Ce chapitre se ferme sur une comparaison des pentes spectrales de températures issues de systèmes automatisés hautes fréquences, localisés dans des zones géographiques variées. Les deux systèmes MAREL (Carnot et Iroise) présentent des coefficients de pente spectrale proches du signe de la turbulence pleinement développée, contrairement aux deux autres systèmes pris en compte (SeaBird Roscoff et VENUS) avec leurs coefficients qui s'éloignent un peu plus de $5/3$. Pour expliquer cette éloignement, on a donc posé l'hypothèse suivante : la géomorphologie des zones où

sont installés ces systèmes et le fait que leurs capteurs embarqués ne puissent pas varier en fonction du marnage, pourrait induire un biais dans les résultats des analyses liées à la théorie de la turbulence.

Cette thèse conforte l'idée proposée par plusieurs auteurs (Dickey, 1991, Dickey et al., 1993, Chavez et al., 1997, Chang and Dickey, 2001, Bensoussan et al., 2004, Nam et al., 2005, Dur et al., 2007, Etcheber et al., 2011, Maneux et al., 2010, Blain et al., 2004) que les mesures hautes fréquences à point fixe sont indispensables pour la compréhension des mécanismes multi-échelles présents en milieu marin. Dans ce cadre-là, il est particulièrement important d'avoir une méthodologie adaptée à l'étude de ce type de bases de données. Les outils utilisés doivent aussi être robustes quant aux périodes manquantes, car il s'agit d'un problème inhérent à ce type de série temporelle. La méthode EMD et les PDF répondent parfaitement à cette problématique et nous ont permis de mettre en évidence plusieurs lois dans notre zone d'étude :

- Plus la structuration dynamique (β) des températures durant les hivers météorologiques augmente, plus la structuration dynamique annuelle de ces mêmes températures augmente.
- Plus la structuration dynamique (β) des températures durant les hivers météorologiques augmente, plus la structuration statistique (α) des blooms augmente.
- Plus la structuration statistique (α) des blooms est importante, plus les abondances moyennes de ces mêmes blooms ont tendance à être importantes.
- Plus la concentration en cryptophycées et en diatomées augmente, plus la structuration statistique (α) des blooms diminue.
- Plus les rapports N/P augmentent, plus la concentration en prymesiophycées augmente.

- Il y a une évolution conjointe entre les concentrations en prymesiophycées et cryptophycées.
- Les faibles températures hivernales ont tendance à engendrer des blooms de forte intensité les printemps suivants.
- Plus le delta des températures surface/fond (stratification) augmente durant la période pré-bloom (15 avril au 15 mai), plus les moyennes annuelles de fluorescence ont tendance à diminuer.

Il y a certainement un lien étroit entre les deux dernières lois évoquées. Par l'intermédiaire de la méthode EMD, on a constaté que les blooms n'étaient pas "lisses" et comportaient en interne d'importantes fluctuations. Ces fluctuations ont sans doute un rapport avec la turbulence, qui agit sur le transport de la matière et génère des hétérogénéités à multi-échelles. L'étude des PDF de fluorescence issues de plusieurs systèmes automatisés nous a aussi permis de remettre en cause le paradigme couramment utilisé en écologie (Wang et al., 2006, Widdicombe et al., 2010, Feuchtmayr et al., 2012, Tsirtsis et al., 2008, Segura et al., 2013) qui utilise le modèle lognormal pour approximer les données d'abondance. Nous avons montré dans cette étude que la loi de puissance permettait un meilleur ajustement des données du proxy de la biomasse phytoplanctonique. La comparaison réalisée entre les réseaux de surveillance basses fréquence et la balise automatisée hautes fréquences MAREL Carnot, nous a permis de nous poser la question de l'existence d'une hétérogénéité à petite échelle qui serait induite par la turbulence. Les études sur la structuration dynamique des températures sur l'ensemble de la Manche (orientale et occidentale) ont montré que les forçages subis par ce paramètre étaient majoritairement contrôlés par les mécanismes astronomiques. Nous avons mis en avant, grâce à la méthode des co-spectres et TDIC, une corrélation qui aurait une échelle caractéristique de 10 jours, avec une transition comprise entre 11 et 172 jours, pour les températures de surface entre la Manche orientale et occidentale. Nous avons donc posé l'hypothèse suivante : globalement, les courants des surfaces dans la Manche remontent vers le détroit,

allant de l'Atlantique vers la Mer du Nord. Les températures de surface présentes à Roscoff influencent les températures de surface à Boulogne-sur-Mer, avec un temps caractéristique de 15 jours correspondant à une durée de transport moyen. Plusieurs lois et échelles caractéristiques ont été trouvées, néanmoins leur universalité reste à évaluer. Cependant l'utilité méthodologique des approches proposées dans cette thèse est susceptible d'être universelles.

Les travaux menés dans cette thèse ouvrent la voie à différentes perspectives. Nous avons confirmé que les séries temporelles hautes fréquences à long terme étaient indispensables pour la compréhension des mécanismes en milieu côtier. Les fortes fluctuations contenues dans les bases de données issues de ces systèmes automatisés en point fixe et l'utilisation de nouvelles méthodes (EMD, TDIC, EMD-HSA) nous ont permis d'extraire des lois et de poser des hypothèses qu'il faut désormais confirmer. Afin de tester l'universalité de ces lois, il faudrait pouvoir utiliser les mêmes protocoles que nous avons proposés dans cette étude sur d'autres bases de données issues des systèmes automatisés hautes fréquences à point fixe en milieu côtier, à travers le monde. En parallèle, pour éviter de biaiser ces futures analyses, il faudrait aussi vérifier si le positionnement des capteurs sur un flotteur et la géomorphologie de la zone d'étude impactent les analyses spectrales. En ce qui concerne les études menées sur les PDF de la production primaire, nous avons constaté un bon ajustement hyperbolique (PDF en loi de puissance). Il serait donc intéressant de continuer dans cette voie, afin de voir l'évolution du comportement du coefficient de pente (α) issu de leurs ajustements en loi de puissance en fonction des zones géographiques considérées.

Des séries temporelles plus longues seraient aussi un atout de taille dans ce type d'étude, cela nous permettrait par exemple de confirmer ou d'infirmer la présence des patterns relevés dans les extrêmes de fluorescence, ou de mieux comprendre les hétérogénéités à petite échelle dans le milieu marin, induites par la

turbulence. Dans le cas où les lois que nous avons ici proposées tendraient à se confirmer, cela pourrait permettre :

- D'utiliser les mécanismes ainsi découverts dans des modèles numériques biogéochimiques adaptés au milieu côtier.
- D'avoir des modèles se basant sur les températures hivernales qui prédiraient l'intensité des blooms ; ce type de modèle pourrait aussi utiliser les rapports N/P et les pentes issues des lois de puissance (α), afin de donner des prédictions sur la concentration des taxons phytoplanctoniques qui seraient alors présents, ainsi que leur ordre de succession dans ces blooms.

Des modèles prédictifs capables de déterminer l'intensité et la composition d'un bloom, avec une échelle de trois mois en se basant principalement sur les températures hivernales, intéresseraient sans doute les organismes publics responsables de la surveillance des littoraux et encouragerait le développement des systèmes automatisés sur les côtes françaises.

L'utilisation de la méthode TDIC étant très gourmande en mémoire vive, il serait intéressant de pouvoir refaire nos analyses en utilisant un puissant calculateur, afin d'éviter de devoir dégrader nos séries temporelles. Il résulterait de cette analyse un plus grand nombre de fenêtres de corrélation, ce qui nous permettrait d'affiner nos conclusions et de réduire l'intervalle de transition que nous avons ici proposé. Conjointement, une étude des variations des cycles de la NAO pourrait être menée, afin d'avoir une meilleure compréhension des mécanismes qui impactent la dynamique des températures de surface.

Depuis la nuit des temps l'homme crée des technologies pour rendre ses tâches quotidiennes plus performantes et plus simples. Or la révolution industrielle a marqué le début du développement quasi-exponentiel de ces technologies, aidé par l'avènement de l'informatique. A l'heure actuelle, la tendance à l'automatisation est globale et les sciences océanographiques ne sont pas épargnées : systèmes

automatisés à point fixe, glider, profileur, ferry box, scanner à phytoplancton et à zooplancton, ... Nous avons déjà vu que les systèmes automatisés se développent de plus en plus dans tous les océans du monde, et une chose est sûre, cette tendance ne risque pas de s'inverser. Mais comme le sous-entendaient déjà les philosophes grecs avec le mythe du roi Minos, les nouvelles technologies engendrent de nouvelles problématiques : création d'une vache en bois donnant naissance au minotaure, puis création du labyrinthe de Dédale pour contenir le minotaure, puis création du fil d'Ariane afin que Thésée retrouve son chemin dans le labyrinthe et création de paires d'ailes par l'ingénieur du labyrinthe pour lui permettre de fuir la colère du roi Minos avec son fils Icare.

Cette thèse cherche donc à répondre à la problématique engendrée par l'arrivée des bases de données hautes fréquences à long terme en apportant des outils méthodologiques adaptés à leur étude. Nous espérons par conséquent que les lois et les méthodes présentées dans ce manuscrit pourront être réutilisées et modifiées par une partie de la communauté océanographique, afin de faire avancer la connaissance sur la compréhension des mécanismes complexes présents dans les écosystèmes marins côtiers.

Annexe 1. Comparaison des méthodes spectrales

1 Introduction

L'un des axes principaux de cette thèse est de trouver une méthodologie adaptée à l'étude des séries temporelles hautes fréquences sur le long terme issues des systèmes automatisés à point fixe. Les analyses spectrales permettent d'extraire des informations sur la structuration dynamique des bases de données, afin d'étudier les fluctuations. Mais comme nous l'avons déjà vu précédemment, un problème inhérent au système automatisé est la non-équidistance dans les fréquences d'échantillonnage liée à de multiples facteurs (bug du système, période de maintenance, vandalisme, ...). Dans cette annexe nous allons donc tester la robustesse de différentes méthodes spectrales : FFT, auto-corrélation, cross-corrélation, Lomb, Fast-Lomb, et EMD-HSA. Ces tests sont réalisés sur un mouvement brownien auquel on a progressivement enlevé des périodes correspondant à un pourcentage de manière à suivre une suite géométrique :

$$U_{n+1} = U_n * r \text{ et } U_n = U_0 * r^n \quad (32)$$

où $U_0 = 5$, la raison $r = 5$ et on enlève un pourcentage jusqu'à U_3 (40%). On utilise un algorithme qui va retirer le pourcentage voulu de deux manières différentes :

- Les données manquantes sont réparties de manière consécutive entre trois périodes.
- Les données manquantes sont réparties de manière totalement aléatoire.

Dans un second temps, on réutilisera le même protocole, mais en remplaçant les valeurs manquantes par des zéros. Le but de cette annexe est de confirmer le choix qui a été effectué au niveau de la méthode d'analyse spectrale utilisée dans cette thèse.

2 La méthode Lomb-Scargle et Fast Lomb

La méthode de Lomb-Scargle, aussi appelée analyse spectrale des moindres carrés ou LSSA en anglais (Least-Squares Spectral Analysis), est une analyse spectrale basée sur une régression des moindres carrés sinusoïdale. Cette méthode est assez couramment appliquée dans les sciences de l'environnement (Schulz and Stattegger, 1997, Fenoglio-Marc, 2001, Love and Rigler, 2014), car elle peut être utilisée sur des bases de données non-équidistantes (Press and Rybicki, 1989, Scargle, 1982, Lomb, 1976). Contrairement à la méthode FFT qui utilise directement les produits scalaires, la méthode de Lomb-Scargle calcule un décalage τ de manière à ce qu'une paire de sinusoïdes soit mutuellement orthogonale à un échantillon de temps (t_j). Le retard de temps est défini par la formule suivante :

$$\tan 2\omega\tau = \frac{\sum_j \sin 2\omega t_j}{\sum_j \cos 2\omega t_j} \quad (33)$$

Et le spectre pour une fréquence ω est alors estimé comme suit :

$$P_x(\omega) = \frac{1}{2} \left(\frac{[\sum_j X_j \cos \omega(t_j - \tau)]^2}{\sum_j \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{[\sum_j X_j \sin \omega(t_j - \tau)]^2}{\sum_j \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right) \quad (34)$$

Il existe aussi une autre version de cet algorithme appelé Fast Lomb (Press and Rybicki, 1989) qui se base sur une recherche orthogonale rapide (Korenberg et al., 1997, Korenberg, 1989). Cette méthode a l'avantage d'optimiser les temps de calcul, ce qui permet l'étude de bases de données plus importantes.

3 Mouvement Brownien

Le mouvement brownien tire son nom du botaniste Robert Brown, qui en 1827 décrivait pour la première fois ce type de comportement aléatoire en étudiant les mouvements des particules à l'intérieur d'un grain de pollen (Brown, 1828). Actuellement, ce mouvement brownien est surtout utilisé en physique pour décrire mathématiquement le mouvement aléatoire d'une particule immergée dans un fluide qui n'est soumis à aucune autre interaction que les chocs provenant de particules plus petites. Cette modélisation est également très utilisée en mathématique, appelée "processus de Wiener" et en finance pour modéliser les fluctuations des cours. Il s'agit donc d'un processus stochastique très classique. Son spectre d'énergie possède une invariance d'échelle avec un exposant $E_b(f)=cf^{-2}$, cette propriété sera utilisée pour tester les méthodes spectrales.

3.1 Présentation des données

Pour construire le mouvement brownien utilisé dans nos tests, nous avons procédé de la manière suivante : une distribution normale aléatoire a été créée avec 8192 points (voir figure 4-1 en haut), puis nous avons calculé la somme cumulée de cette distribution, afin d'obtenir notre mouvement brownien (voir figure 4-2 en bas). Il est important de noter que nous utiliserons toujours le même mouvement brownien tout au long de cette analyse. Et que le nombre de points utilisés pour sa création ne dépasse pas les 9000 points, ce qui permet d'effectuer les calculs liés aux différentes analyses spectrales lors du même run pour le besoin de notre comparaison ; ce qui aurait été impossible avec un signal d'entrée plus long.

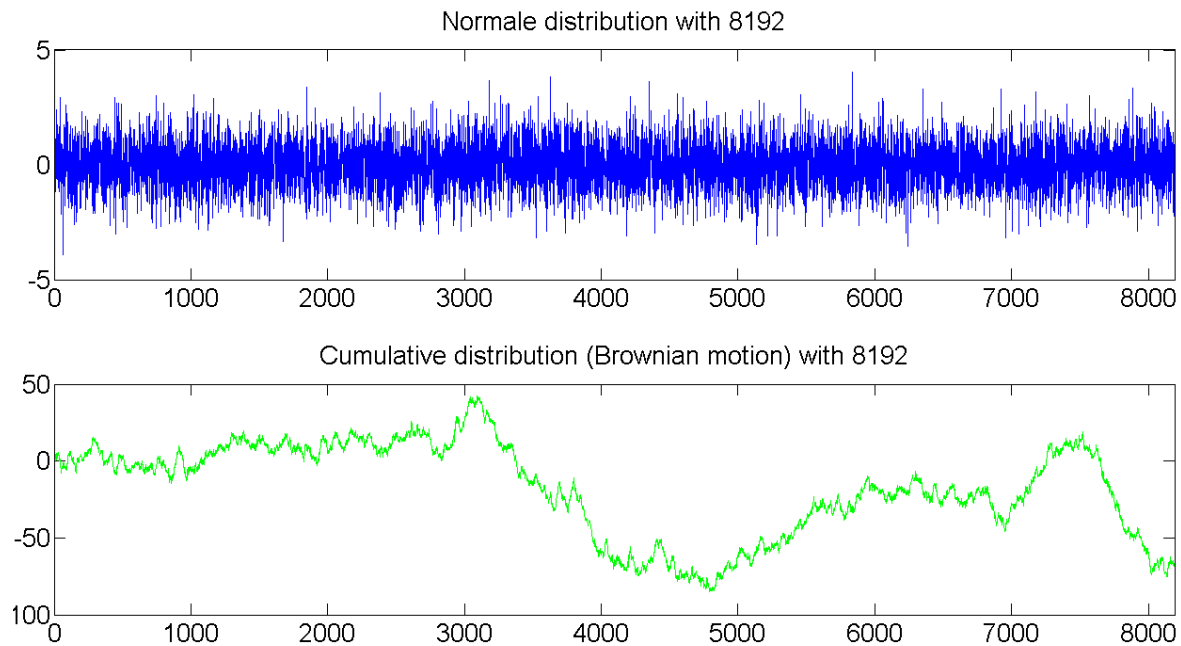


Figure 4-1. Mouvement brownien utilisé dans les comparaisons des méthodes spectrales. En haut : distribution cumulative réalisée avec 8192 points. En bas : mouvement brownien réalisé avec la somme cumulée de la distribution.

3.2 Analyses spectrales

La figure 4-2 présente les résultats des différentes méthodes d'analyses spectrales effectuées avec notre mouvement brownien sans aucune période manquante ou de zéros. Une pente spectrale proche de 2 est attendu, donc plus les résultats s'approchent de cette valeur, plus la méthode est précise. Dans le cas de la figure 4-2, on voit que les méthodes EMD-HSA, FFT, et d'auto-corrélation (irrégulière) donnent une meilleure réponse. Et que les deux méthodes de Lomb (classique et rapide) s'éloignent fortement de 2. La figure 4-3 montre les deux spectres issus des méthodes de Lomb sans filtration, on peut voir en utilisant cette approche que les pentes spectrales calculées sont beaucoup plus proches de 2. On constate aussi que les résultats de ces deux méthodes sont quasi-similaires avec des pentes spectrales égales à 1,8. L'application d'une filtration sur les données brutes issues de la méthode de

Lomb est à proscrire, car cette dernière va fortement biaiser le coefficient de la pente spectrale. Pour des raisons de lisibilité, nous avons donc séparé les figures contenant les spectres de Lomb non filtrés et les autres analyses spectrales, dans le reste de cette étude comparative.

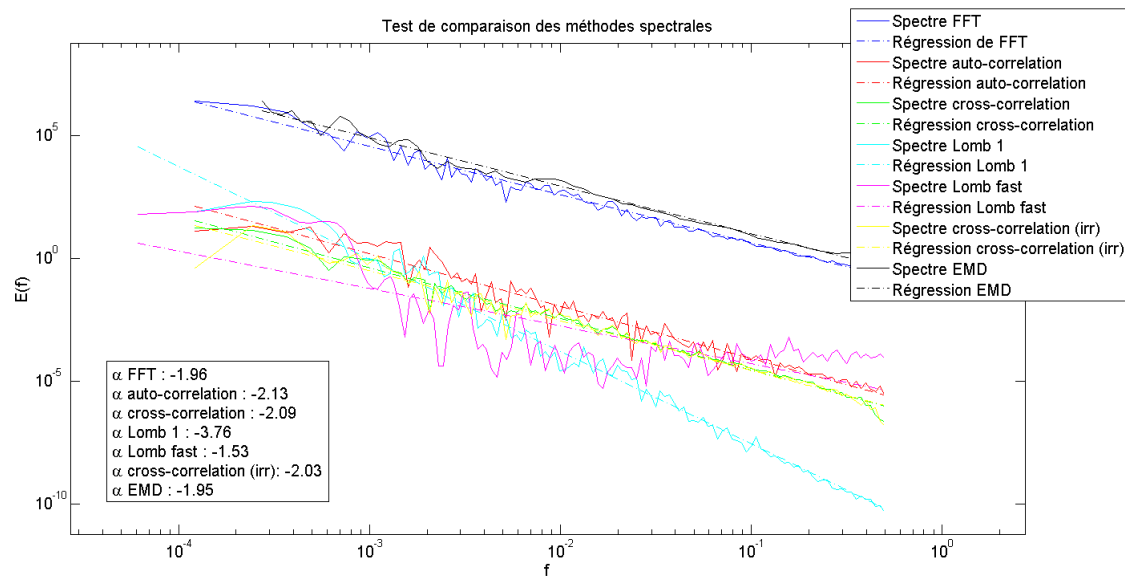


Figure 4-2. Test de comparaison des différentes méthodes spectrales réalisé sur un mouvement brownien non dégradé. La correspondance entre les couleurs et les méthode est la suivante : bleu FFT ; rouge auto-corrélation ; vert cross-corrélation ; cyan Lomb ; violet Fast Lomb ; jaune cross-corrélation (irrégulière) ; noir EMD-HSA.

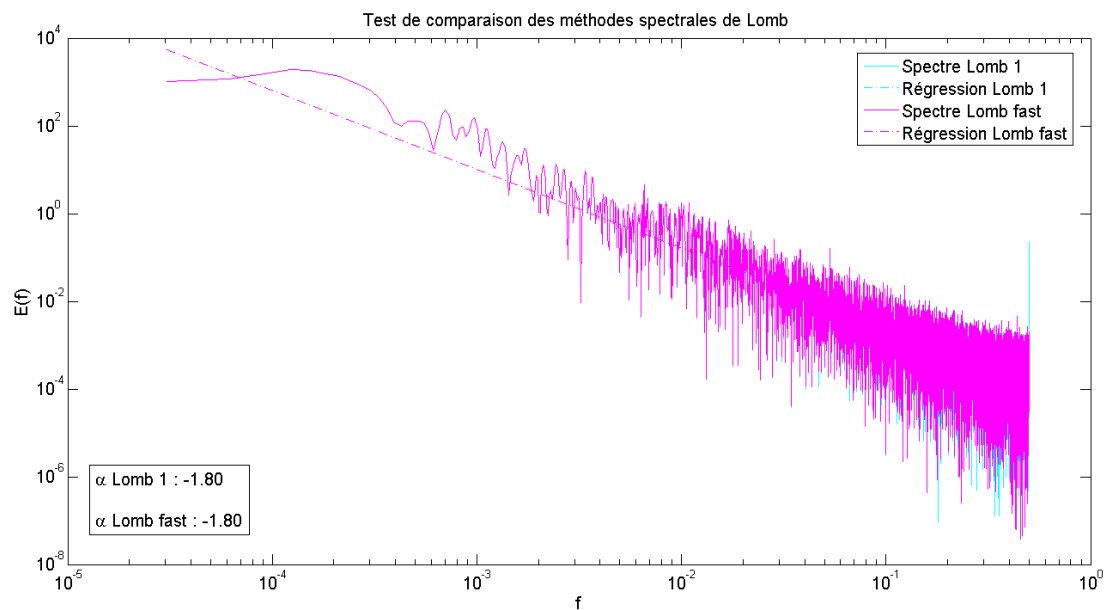


Figure 4-3. Comparaison des méthodes de Lomb classique (en cyan) et Fast Lomb (en magenta), sans filtration.

4 Tests avec des répartitions continues

4.1 Présentation des données

Dans cette partie 4, nous allons tester la robustesse des méthodes spectrales en dégradant le signal de notre mouvement brownien de manière à avoir trois périodes consécutives correspondantes à des valeurs manquantes ou à des zéros. Les figures 4-4 à 4-7 présentent les données qui sont utilisées en entrée de nos tests, avec en bas, les signaux altérés correspondant aux périodes manquantes, et au milieu, les mêmes périodes mises à zéros. Chaque figure correspond à un pourcentage de signal dégradé : 5% pour la figure 4-4 ; 10% pour la figure 4-5 ; 20% pour la figure 4-6 ; 40% pour la figure 4-7.

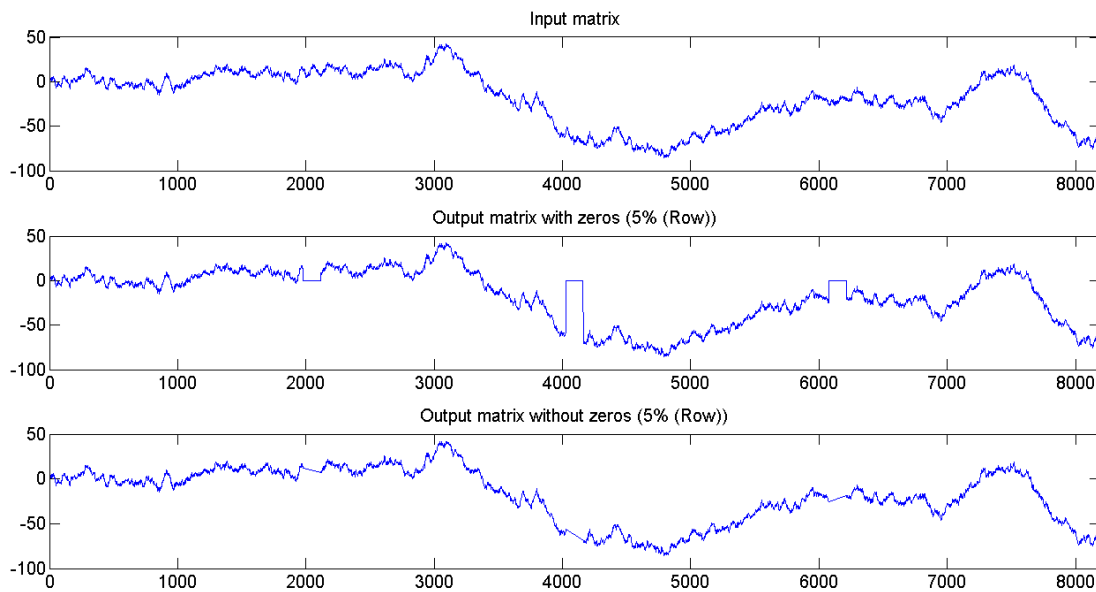


Figure 4-4. Visualisation du mouvement brownien avec 5% de dégradation du signal réparti entre 3 périodes consécutives. En haut : mouvement brownien non dégradé. Au milieu : période manquante remplacée par des zéros. En bas : périodes manquantes.

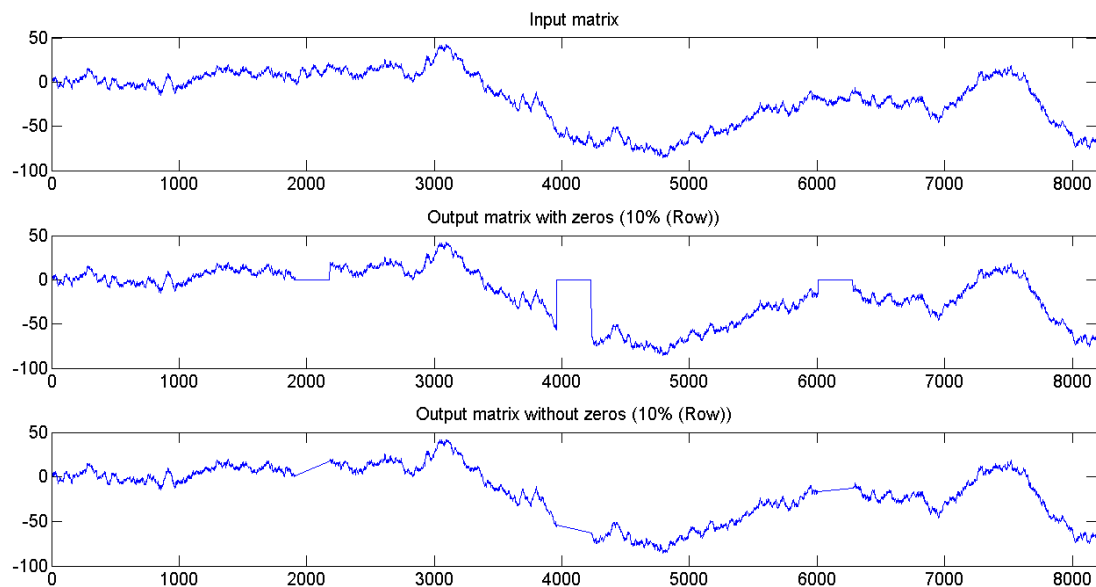


Figure 4-5. Visualisation du mouvement brownien avec 10% de dégradation du signal réparti entre 3 périodes consécutives. En haut : mouvement brownien non dégradé. Au milieu : période manquante remplacée par des zéros. En bas : périodes manquantes.

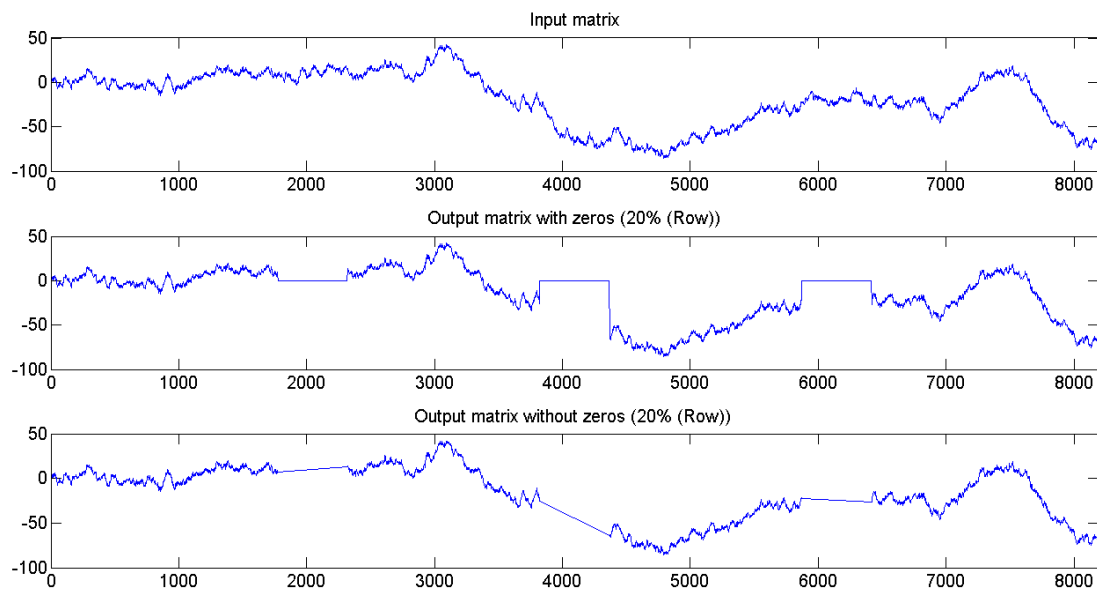


Figure 4-6. Visualisation du mouvement brownien avec 20% de dégradation du signal réparti entre 3 périodes consécutives. En haut : mouvement brownien non dégradé. Au milieu : période manquante remplacée par des zéros. En bas : périodes manquantes.

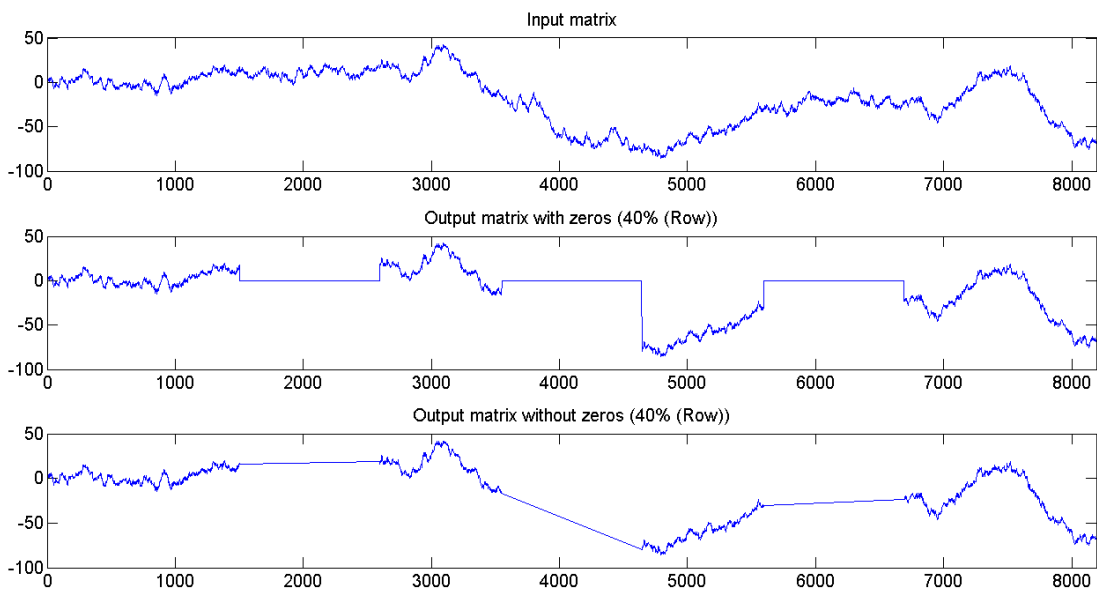


Figure 4-7. Visualisation du mouvement brownien avec 40% de dégradation du signal réparti entre 3 périodes consécutives. En haut : mouvement brownien non dégradé. Au milieu : période manquante remplacée par des zéros. En bas : périodes manquantes.

4.2 Analyses spectrales

4.2.1 Tests avec zéros

Dans cette partie, on va tester le comportement de nos méthodes d'analyses spectrales, quand les valeurs manquantes sont remplacées par des zéros et réparties de manière consécutive. On réalise quatre tests des périodes dégradées de manière progressive : 5% (voir figures 4-8 et 4-9) ; 10% (voir figures 4-10 et 4-11) ; 20% (voir figures 4-12 et 4-13) ; 40% (voir figures 4-14 et 4-15). Le tableau 4-1 consigne toutes les pentes spectrales qui résultent de ce test. Nous avons aussi calculé les moyennes pour chaque type de méthode ici analysée, ainsi que leur écart-type et leur "éloignement moyen" (2-moyenne du type de pente spectrale considérée), que nous avons nommé écart dans le tableau.

Les périodes mises à zéros de manière consécutive ne semblent pas avoir un fort impact sur les méthodes testées, à part dans le cas de la méthode EMD-HSA. On voit qu'à partir de 20% de dégradation (voir figures 4-12 et 4-14), le coefficient de pente s'éloigne de plus en plus de 2, pour atteindre les 3,26 pour 40%. La méthode de cross-corrélation (irrégulière) est la plus adaptée à ce type de dégradation, avec un écart-type (STD) de 0,03 et une valeur d'écartement à la moyenne de 0,04. La méthode de cross-corrélation et d'auto-corrélation donnent aussi de bons résultats, mais il y a respectivement un écart à la moyenne et un écart-type plus important. Quant aux deux méthodes de Lomb, elles sont très stables avec des écart-types faibles égaux à 0,02, mais il semble y avoir un biais systématique d'environ 0,20.

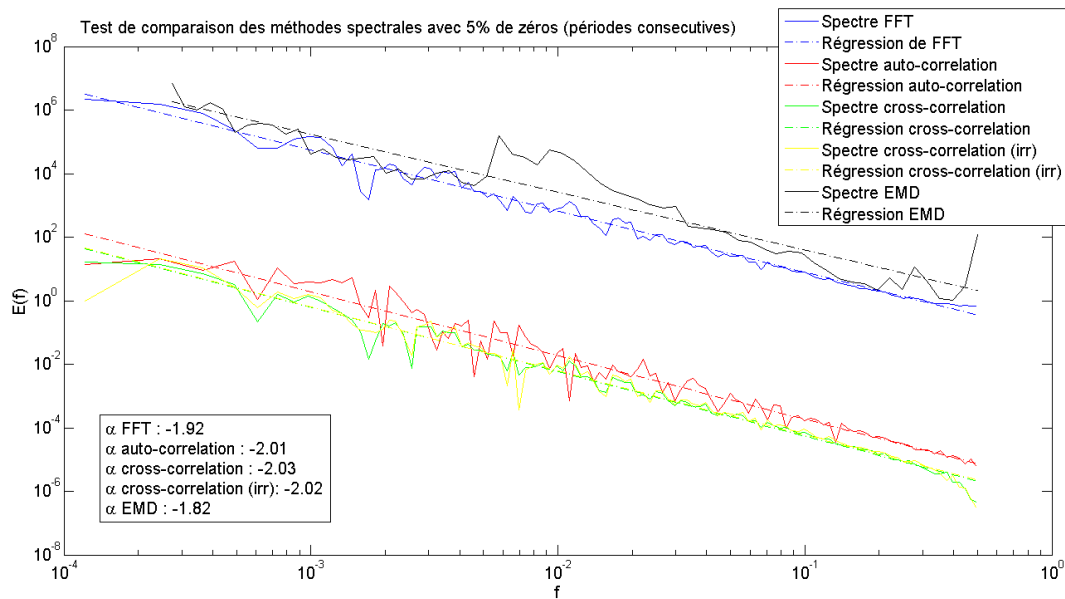


Figure 4-8. Comparaison de différentes méthodes spectrales réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 5% de zéros répartis de manière consécutive. La correspondance entre les couleurs et les méthodes est la suivante : bleu FFT ; rouge auto-corrélation ; vert cross-corrélation; jaune cross-corrélation (irrégulière) ; noir EMD-HSA.

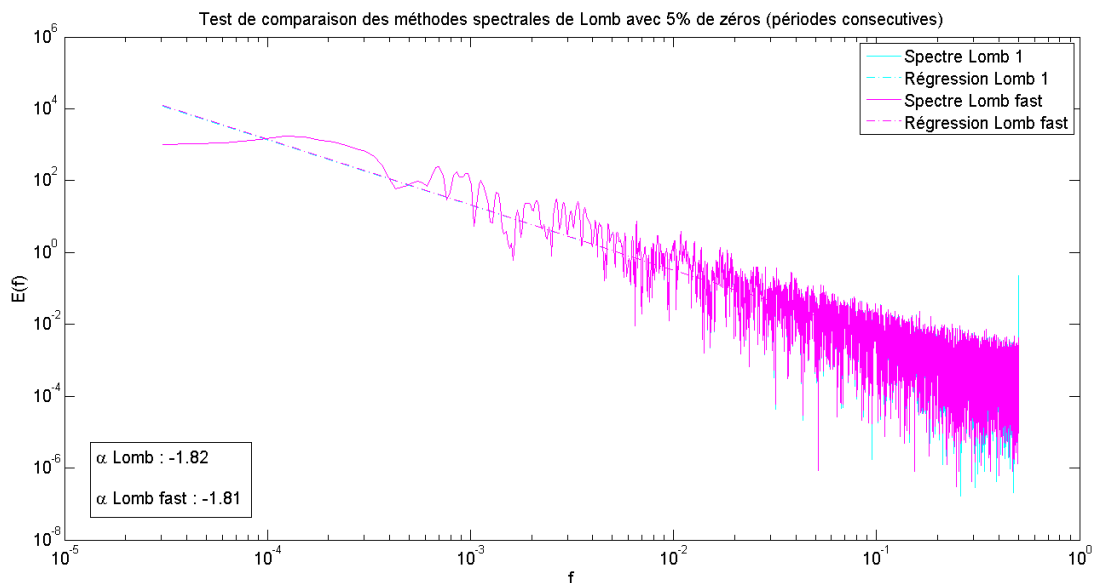


Figure 4-9. Comparaison des méthodes de Lomb classique (en cyan) et Fast Lomb (en magenta), réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 5% de zéros répartis de manière consécutive.

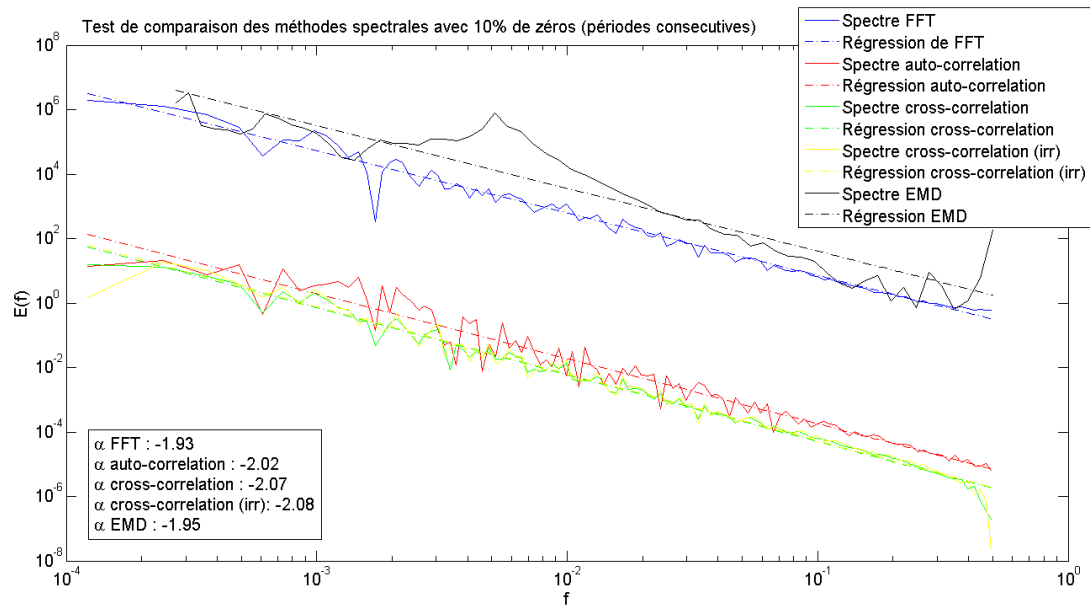


Figure 4-10. Comparaison de différentes méthodes spectrales réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 10% de zéros répartis de manière consécutive. La correspondance entre les couleurs et les méthodes est la suivante : bleu FFT ; rouge auto-corrélation ; vert cross-corrélation ; jaune cross-corrélation (irrégulière) ; noir EMD-HSA.

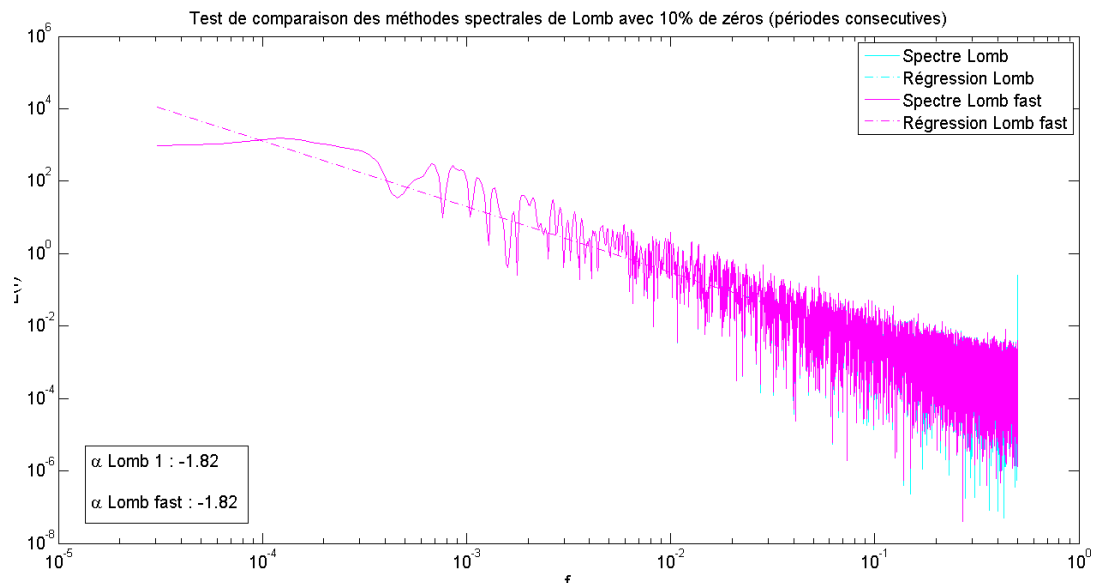


Figure 4-11. Comparaison des méthodes de Lomb classique (en cyan) et Fast Lomb (en magenta), réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 10% de zéros répartis de manière consécutive.

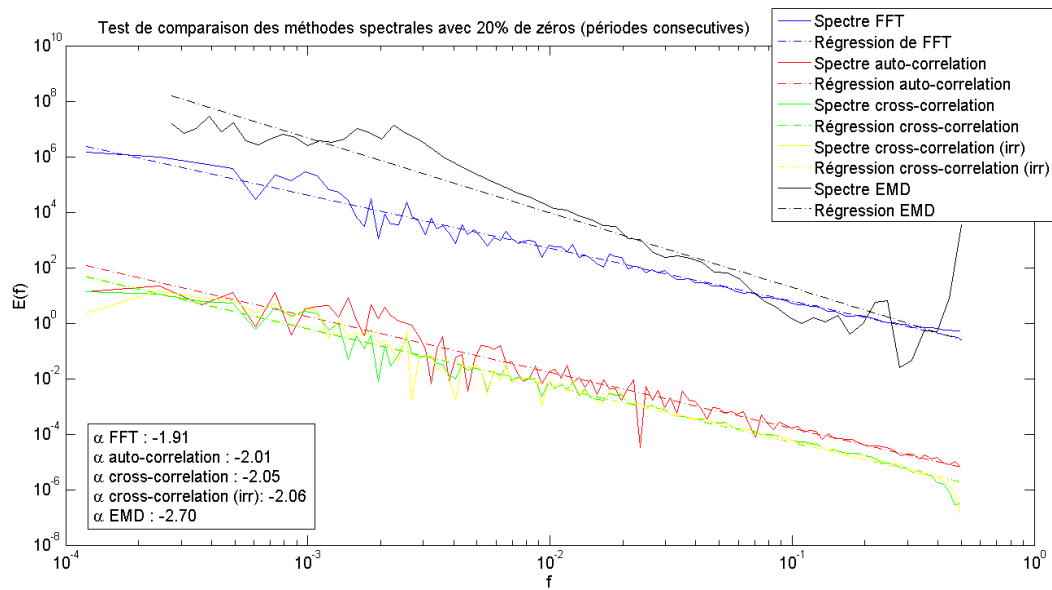


Figure 4-12. Comparaison de différentes méthodes spectrales réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 20% de zéros répartis de manière consécutive. La correspondance entre les couleurs et les méthodes est la suivante : bleu FFT ; rouge auto-corrélation ; vert cross-corrélation; jaune cross-corrélation (irrégulière) ; noir EMD-HSA.

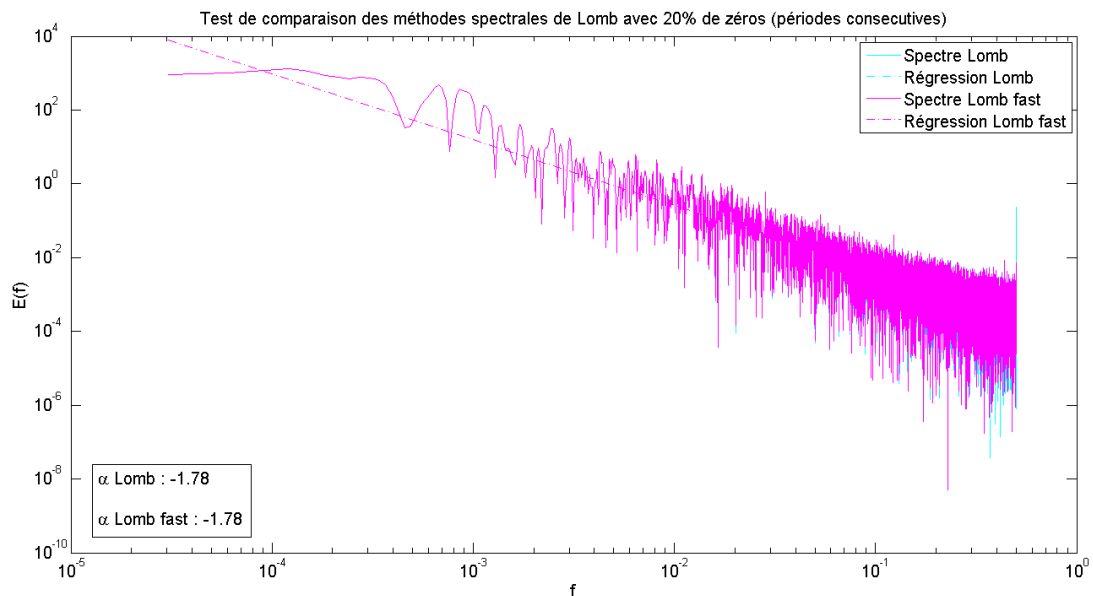


Figure 4-13. Comparaison des méthodes de Lomb classique (en cyan) et Fast Lomb (en magenta), réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 20% de zéros répartis de manière consécutive.

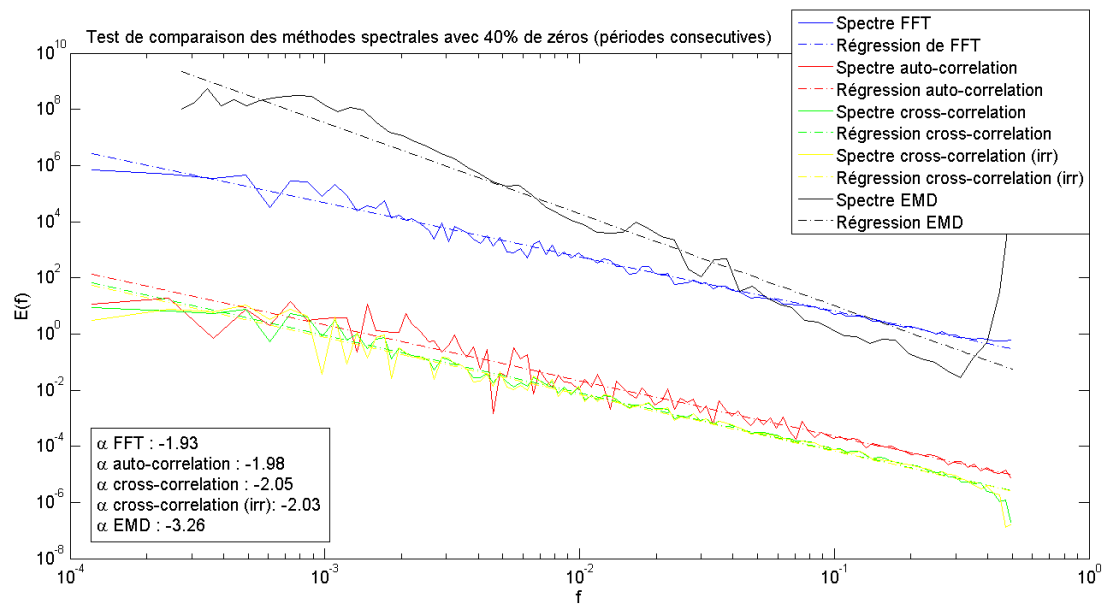


Figure 4-14. Comparaison de différentes méthodes spectrales réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 40% de zéros répartis de manière consécutive. La correspondance entre les couleurs et les méthode est la suivante : bleu FFT ; rouge auto-corrélation ; vert cross-corrélation; jaune cross-corrélation (irrégulière) ; noir EMD-HSA.

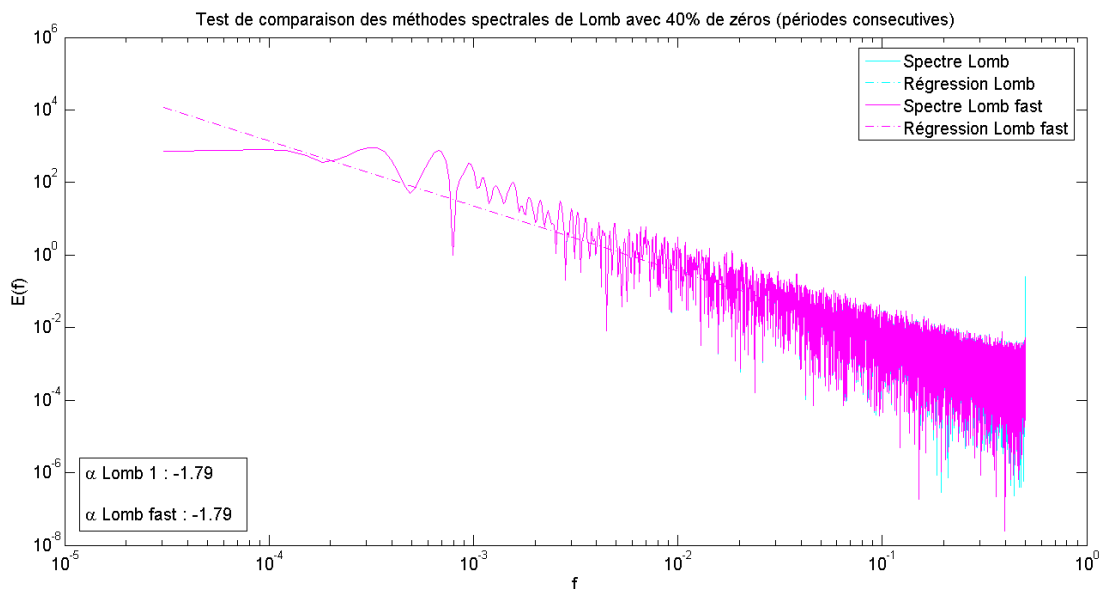


Figure 4-15. Comparaison des méthodes de Lomb classique (en cyan) et Fast Lomb (en magenta), réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 40% de zéros répartis de manière consécutive.

Zéros repartie de manier consécutive							
	α FFT	α auto-cor	α Cross	α Lomb	α Fast Lomb	α cross (irr)	α EMD
100% val	-1,96	-2,13	-2,09	-1,80	-1,80	-2,03	-1,95
95% val	-1,92	-2,01	-2,03	-1,82	-1,82	-2,02	-1,82
90% val	-1,93	-2,02	-2,07	-1,82	-1,82	-2,08	-1,95
80% val	-1,91	-2,01	-2,05	-1,78	-1,78	-2,06	-2,70
60% val	-1,93	-1,98	-2,05	-1,79	-1,79	-2,03	-3,26
Moyenne	-1,93	-2,03	-2,06	-1,80	-1,80	-2,04	-2,34
STD	0,02	0,06	0,02	0,02	0,02	0,03	0,62
Ecart	0,07	0,03	0,06	0,20	0,20	0,04	0,34

Tableau 4-1. Récapitulatif des pentes spectrales issues des tests réalisés avec les signaux dégradés : zéros répartis entre 3 périodes consécutives.

4.2.2 Tests avec périodes manquantes

Dans cette partie, on utilise le même protocole que précédemment (voir partie 4.2.1), mais ici la dégradation est effectuée avec des périodes consécutives manquantes : 5% (voir figure 4-16 et 4-17) ; 10% (voir 4-18 et 4-19) ; 20% (voir 4-20 et 4-21) ; 40% (voir figure 4-22 et 4-23). Les résultats de cette étude sont consignés dans le tableau 4-2. Avec un écart-type de 0,02 et une valeur de 0,05 pour l'écart à la moyenne, la méthode FFT est la plus adaptée à cette problématique, suivie de près par la méthode de cross-corrélation et EMD-HSA. Nous avons vu dans le tableau 4-1 que les résultats des deux méthodes de Lomb étaient quasiment les mêmes, or ici la méthode classique est légèrement plus performante, mais le biais systématique de 0,20 semble toujours présent.

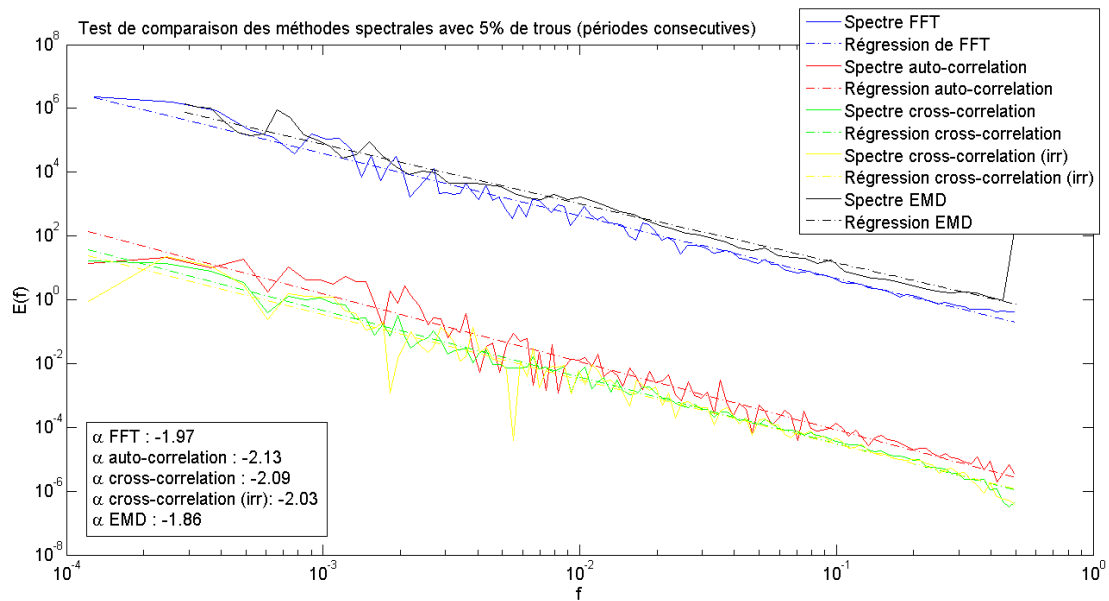


Figure 4-16. Comparaison de différentes méthodes spectrales réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 5% de périodes manquantes réparties de manière consécutive. La correspondance entre les couleurs et les méthodes est la suivante : bleu FFT ; rouge auto-corrélation ; vert cross-corrélation; jaune cross-corrélation (irrégulière) ; noir EMD-HSA.

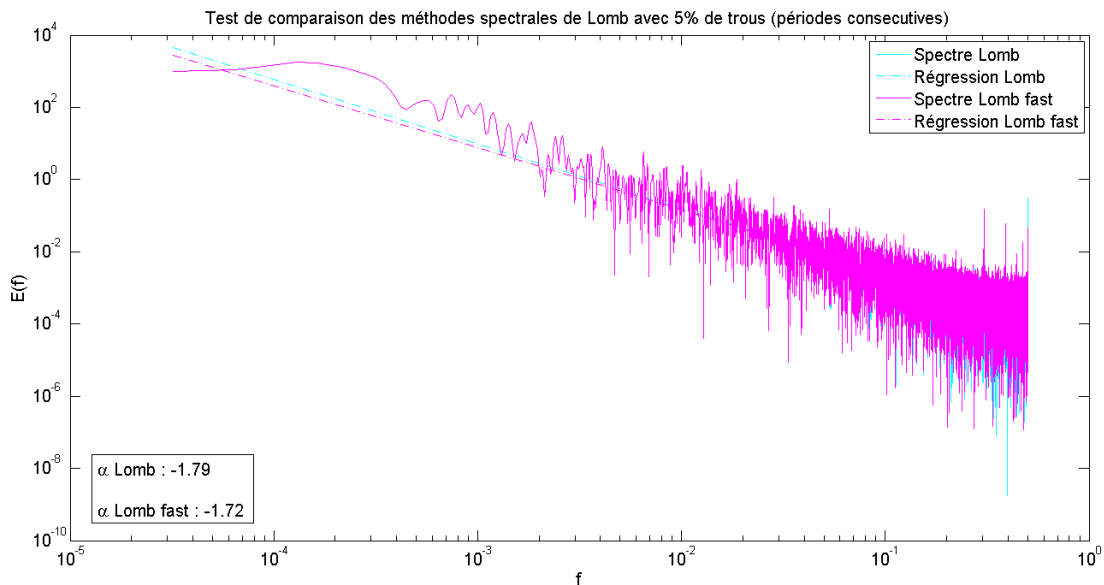


Figure 4-17. Comparaison des méthodes de Lomb classique (en cyan) et Fast Lomb (en magenta), réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 5% de périodes manquante réparties de manière consécutive.

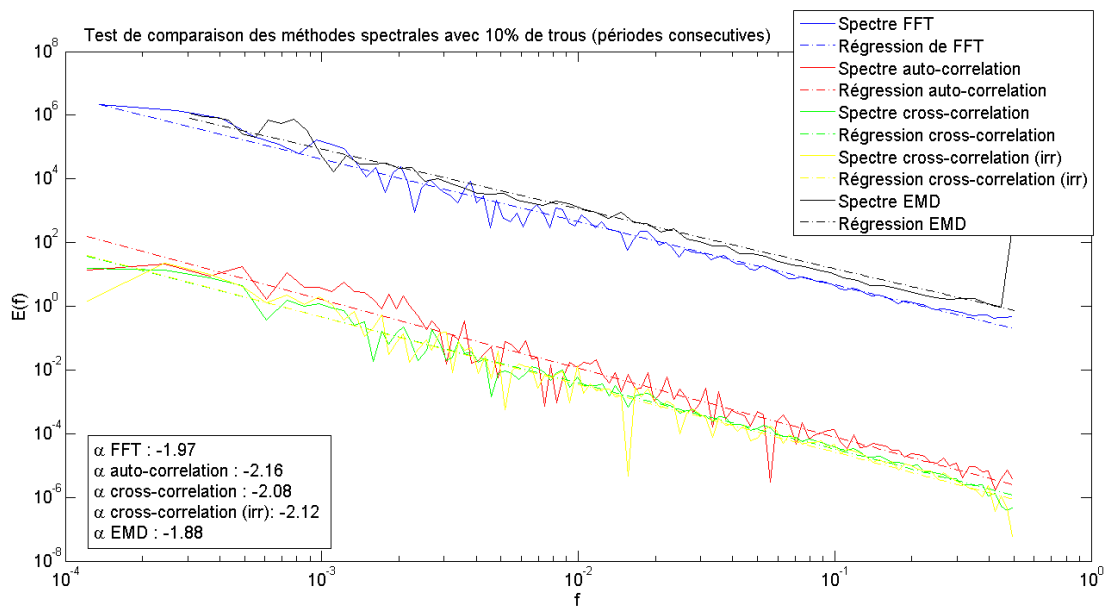


Figure 4-18. Comparaison de différentes méthodes spectrales réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 10% de périodes manquantes réparties de manière consécutive. La correspondance entre les couleurs et les méthodes est la suivante : bleu FFT ; rouge auto-corrélation ; vert cross-corrélation; jaune cross-corrélation (irrégulière) ; noir EMD-HSA.

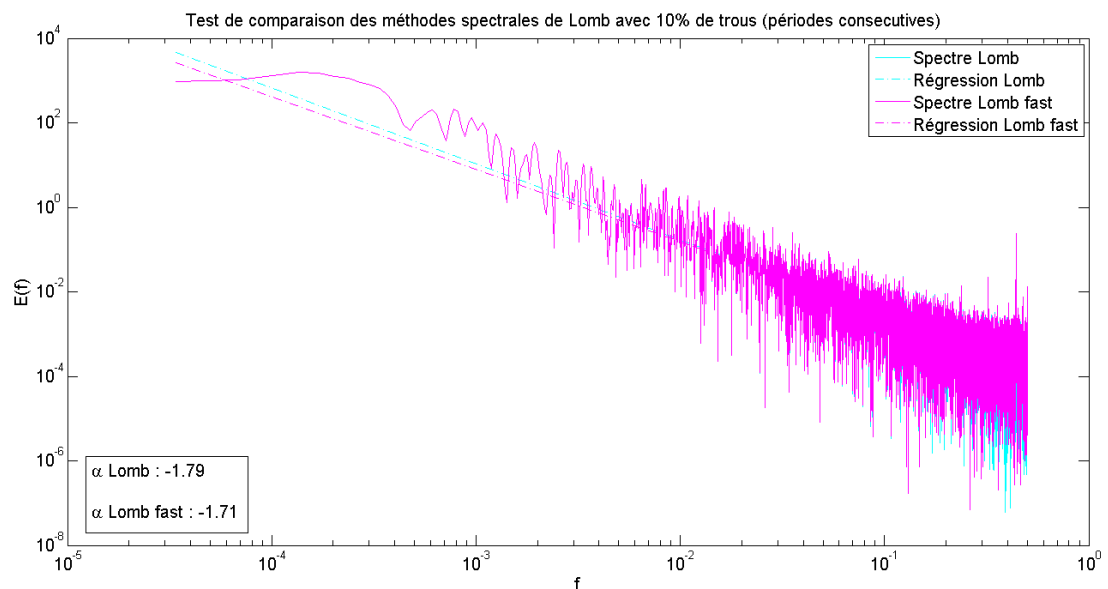


Figure 4-19. Comparaison des méthodes de Lomb classique (en cyan) et Fast Lomb (en magenta), réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 10% de périodes manquante réparties de manière consécutive.

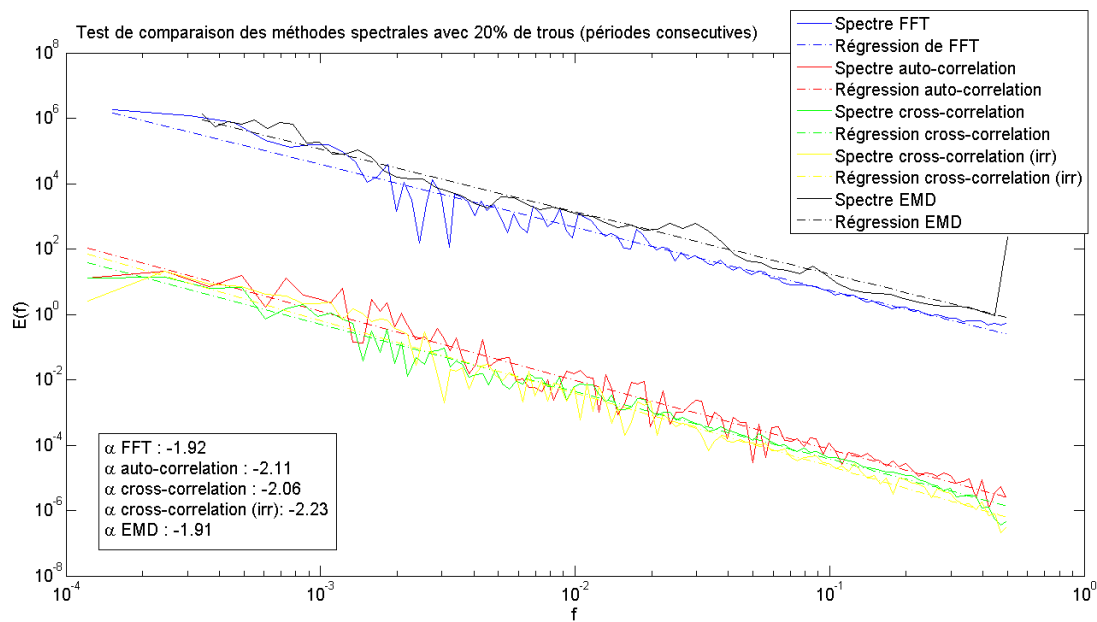


Figure 4-20. Comparaison de différentes méthodes spectrales réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 20% de périodes manquantes réparties de manière consécutive. La correspondance entre les couleurs et les méthodes est la suivante : bleu FFT ; rouge auto-corrélation ; vert cross-corrélation; jaune cross-corrélation (irrégulière) ; noir EMD-HSA.

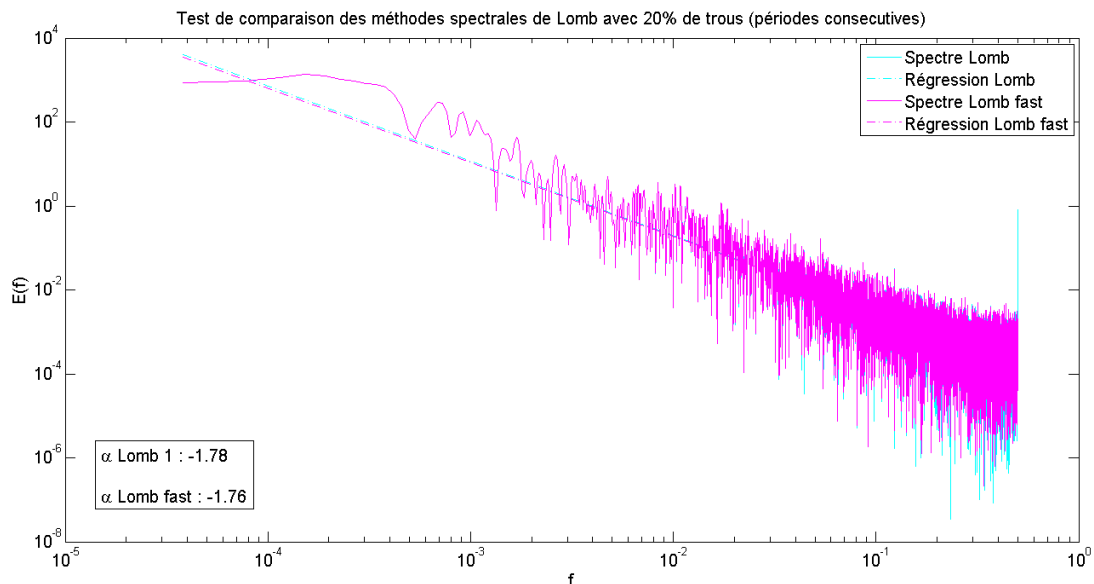


Figure 4-21. Comparaison des méthodes de Lomb classique (en cyan) et Fast Lomb (en magenta), réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 20% de périodes manquante réparties de manière consécutive.

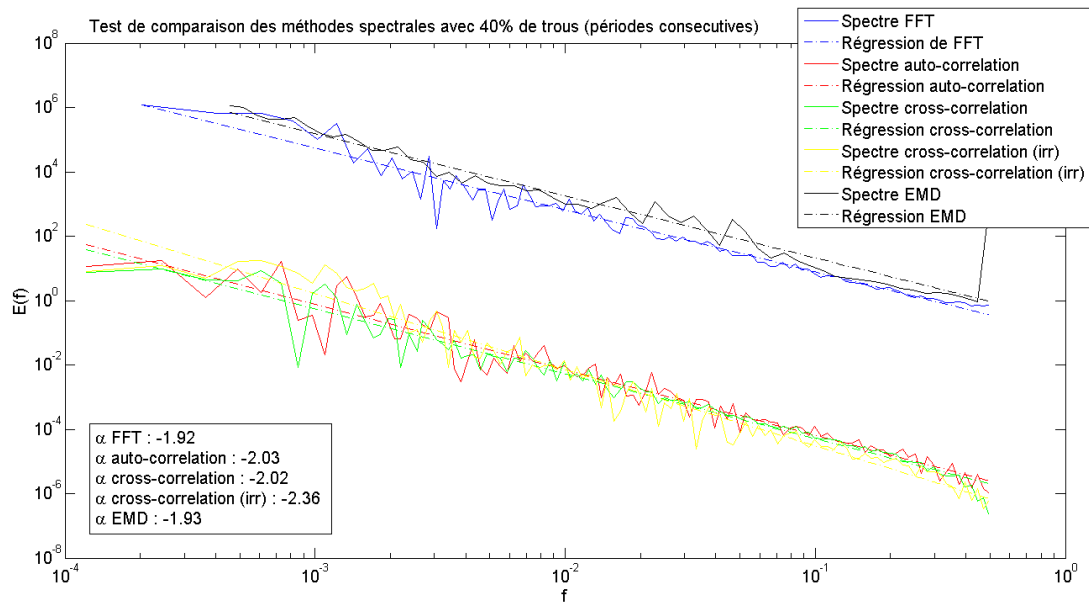


Figure 4-22. Comparaison de différentes méthodes spectrales réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 40% de périodes manquantes réparties de manière consécutive. La correspondance entre les couleurs et les méthodes est la suivante : bleu FFT ; rouge auto-corrélation ; vert cross-corrélation; jaune cross-corrélation (irrégulière) ; noir EMD-HSA.

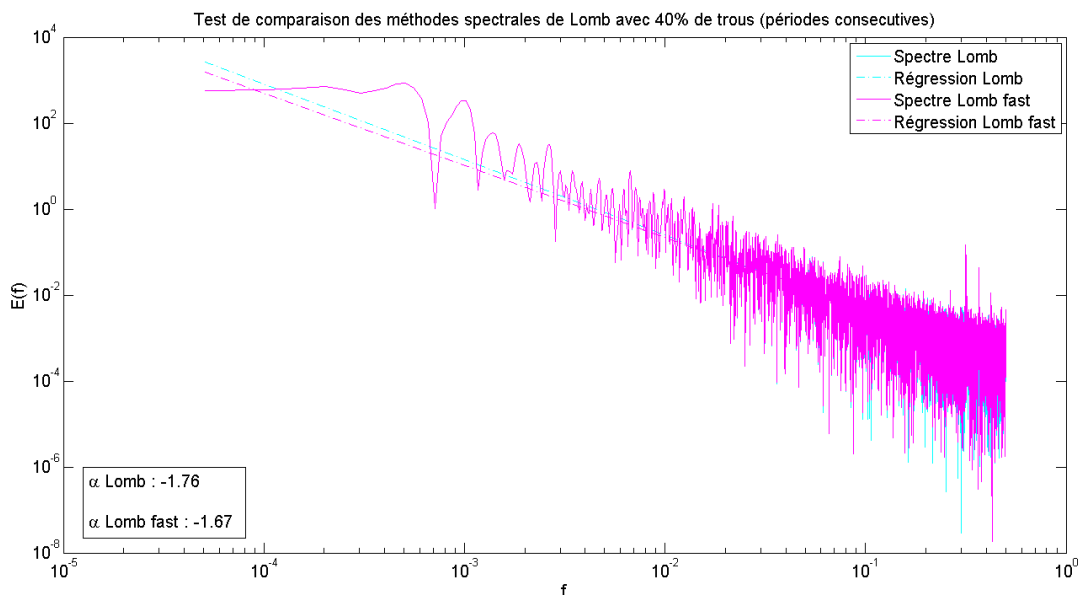


Figure 4-23. Comparaison des méthodes de Lomb classique (en cyan) et Fast Lomb (en magenta), réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 40% de périodes manquantes réparties de manière consécutive.

Trous repartie de manier consecutive							
	α FFT	α auto-cor	α Cross	α Lomb	α Fast Lomb	α cross (irr)	α EMD
100% val	-1,96	-2,13	-2,09	-1,80	-1,80	-2,03	-1,95
95% val	-1,97	-2,13	-2,09	-1,79	-1,72	-2,03	-1,86
90% val	-1,97	-2,16	-2,08	-1,79	-1,71	-2,12	-1,88
80% val	-1,92	-2,11	-2,06	-1,78	-1,76	-2,23	-1,91
60% val	-1,92	-2,03	-2,02	-1,76	-1,67	-2,36	-1,93
Moyenne	-1,95	-2,11	-2,07	-1,78	-1,73	-2,15	-1,90
STD	0,02	0,05	0,03	0,02	0,05	0,14	0,04
Ecart	0,05	0,11	0,07	0,22	0,27	0,15	0,10

Tableau 4-2. Récapitulatif des pentes spectrales issues des tests réalisés avec les signaux dégradés : 3 périodes manquantes réparties de manière consécutives.

5 Tests avec des répartitions aléatoires

5.1 Présentation des données

Dans cette section 5, nous allons continuer de tester la robustesse des méthodes spectrales, mais contrairement à la partie 4, le mouvement brownien est ici dégradé de manière aléatoire (valeurs manquantes et zéros). Les figures 4-24 à 4-27 présentent les données qui sont utilisées en entrée de nos tests, avec en bas les valeurs manquantes et au milieu les mêmes valeurs mises à zéros. Chaque figure correspond à un pourcentage de signal dégradé : 5% pour la figure 4-24 ; 10% pour la figure 4-25 ; 20% pour la figure 4-26 ; 40% pour la figure 4-27.

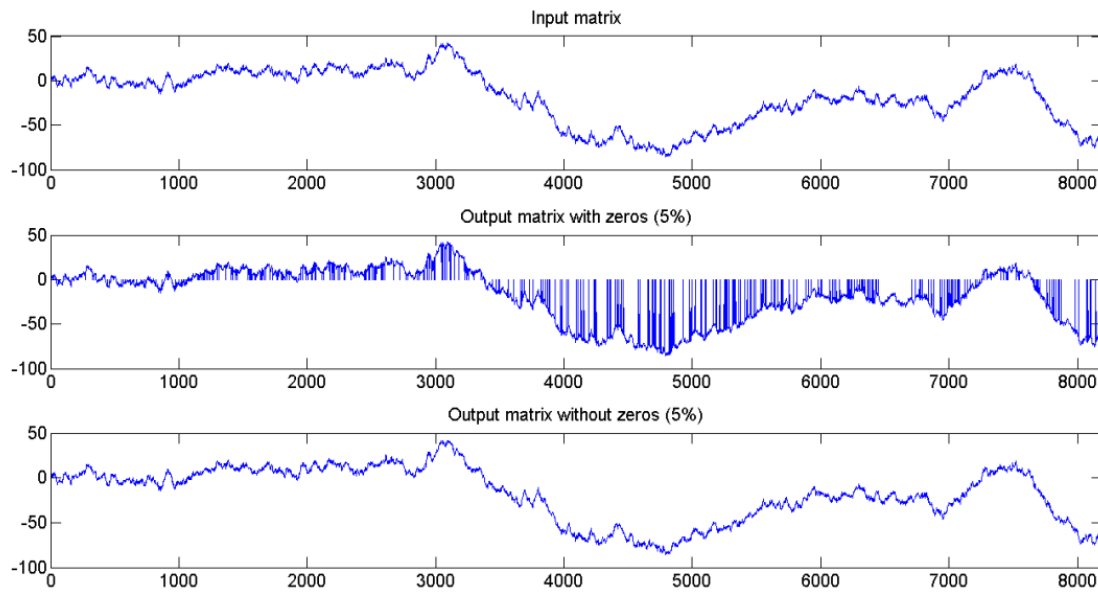


Figure 4-24. Visualisation du mouvement brownien avec 5% de dégradation du signal répartie aléatoirement. En haut : mouvement brownien non dégradé. Au milieu : valeurs manquantes remplacées par des zéros. En bas : valeurs manquantes.

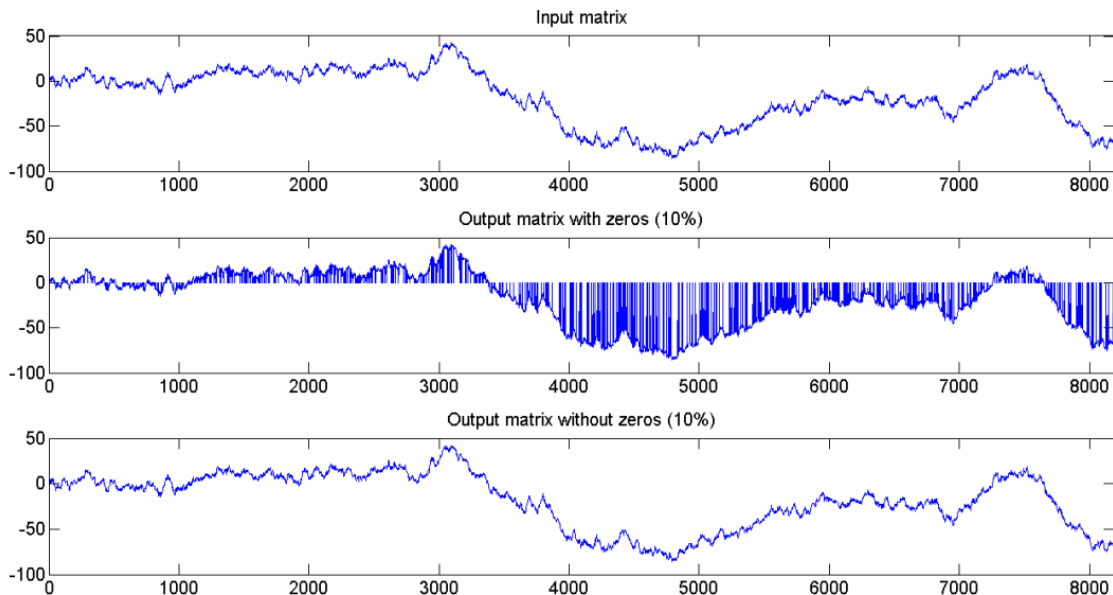


Figure 4-25. Visualisation du mouvement brownien avec 10% de dégradation du signal répartie aléatoirement. En haut : mouvement brownien non dégradé. Au milieu : valeurs manquantes remplacées par des zéros. En bas : valeurs manquantes.

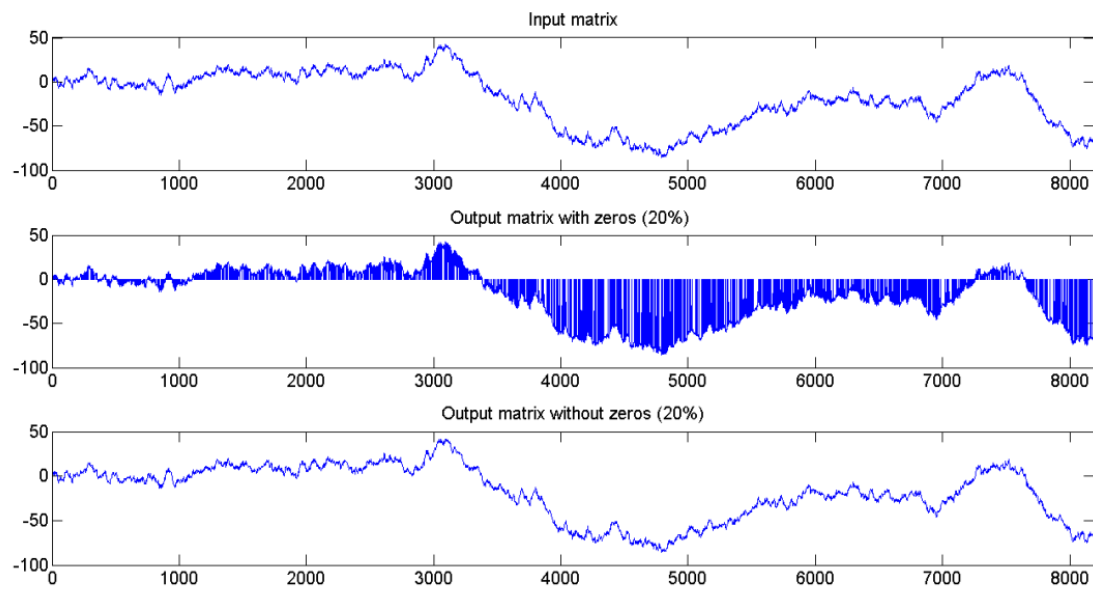


Figure 4-26. Visualisation du mouvement brownien avec 20% de dégradation du signal répartie aléatoirement. En haut : mouvement brownien non dégradé. Au milieu : valeurs manquantes remplacées par des zéros. En bas : valeurs manquantes.

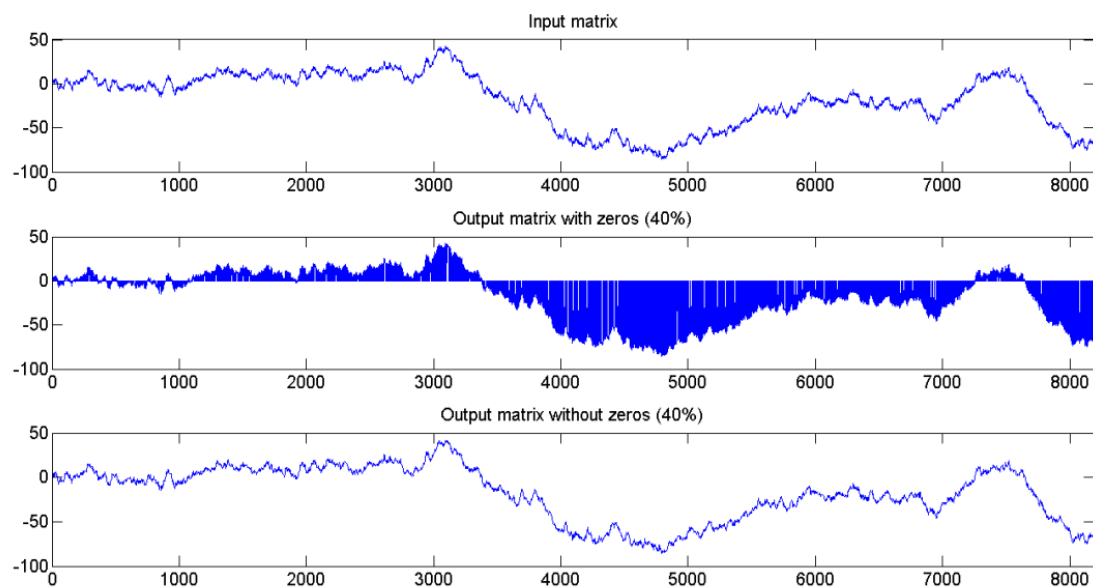


Figure 4-27. Visualisation du mouvement brownien avec 40% de dégradation du signal répartie aléatoirement. En haut : mouvement brownien non dégradé. Au milieu : valeurs manquantes remplacées par des zéros. En bas : valeurs manquantes.

5.2 Analyses spectrales

5.2.1 Tests avec zéros

Dans cette partie, on effectue nos tests avec un pourcentage de valeurs manquantes mises à zéros : 5% (voir figures 4-28 et 4-29) ; 10% (voir figures 4-30 et 4-31) ; 20% (voir figures 4-32 et 4-33) ; 40% (voir figures 4-34 et 4-35). Le tableau 4-3 consigne les résultats des analyses spectrales, on voit clairement que dans ce cas de figure, aucune méthode ne donne de réponse correcte. La méthode de cross-corrélation (irrégulière) avec sa moyenne des pentes spectrales de 1,41 est la plus proche de 2, et son écart-type est le plus faible avec une valeur de 0,39. Le remplacement des valeurs manquantes par des zéros dans les séries temporelles est donc à proscrire pour les méthodes d'analyses spectrales qui sont ici présentées.

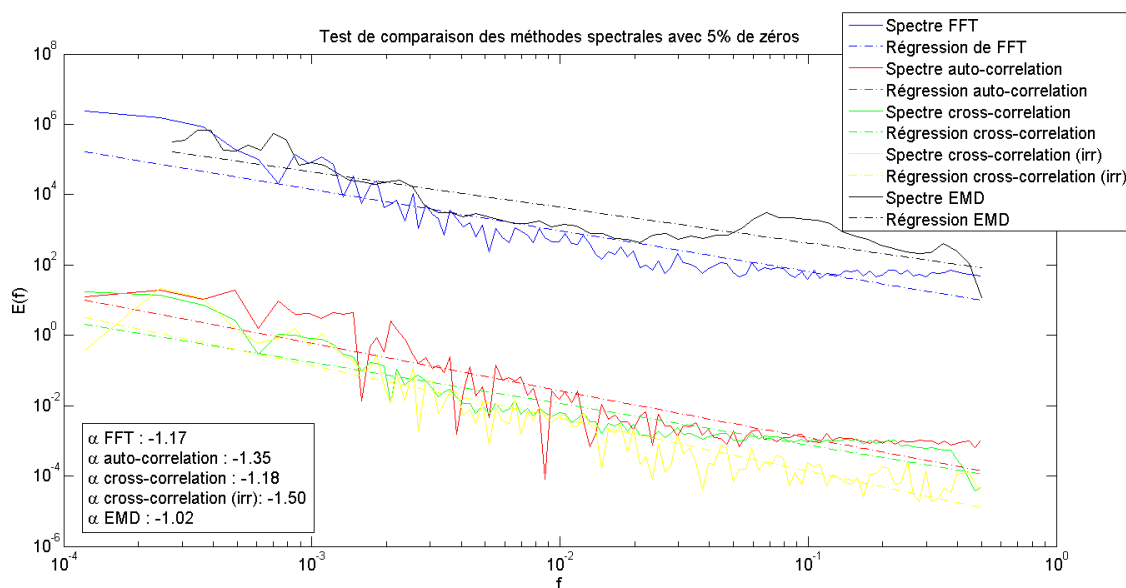


Figure 4-28. Comparaison de différentes méthodes spectrales réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 5% de zéros répartis de manière aléatoire. La correspondance entre les couleurs et les méthodes est la suivante : bleu FFT ; rouge auto-corrélation ; vert cross-corrélation ; jaune cross-corrélation (irrégulière) ; noir EMD-HSA.

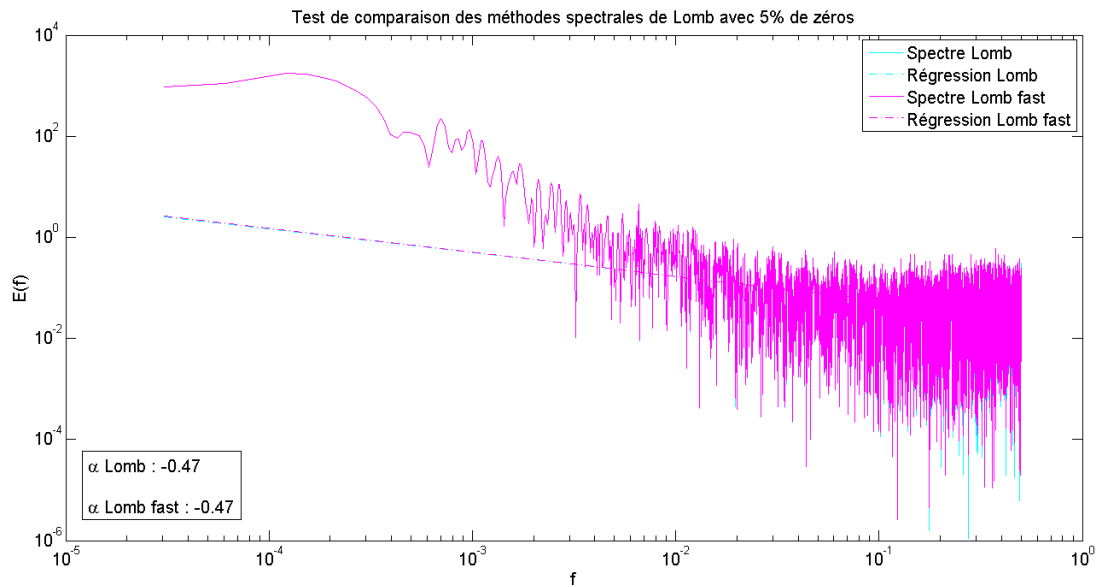


Figure 4-29. Comparaison des méthodes de Lomb classique (en cyan) et Fast Lomb (en magenta), réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 5% de zéros répartis de manière aléatoire.

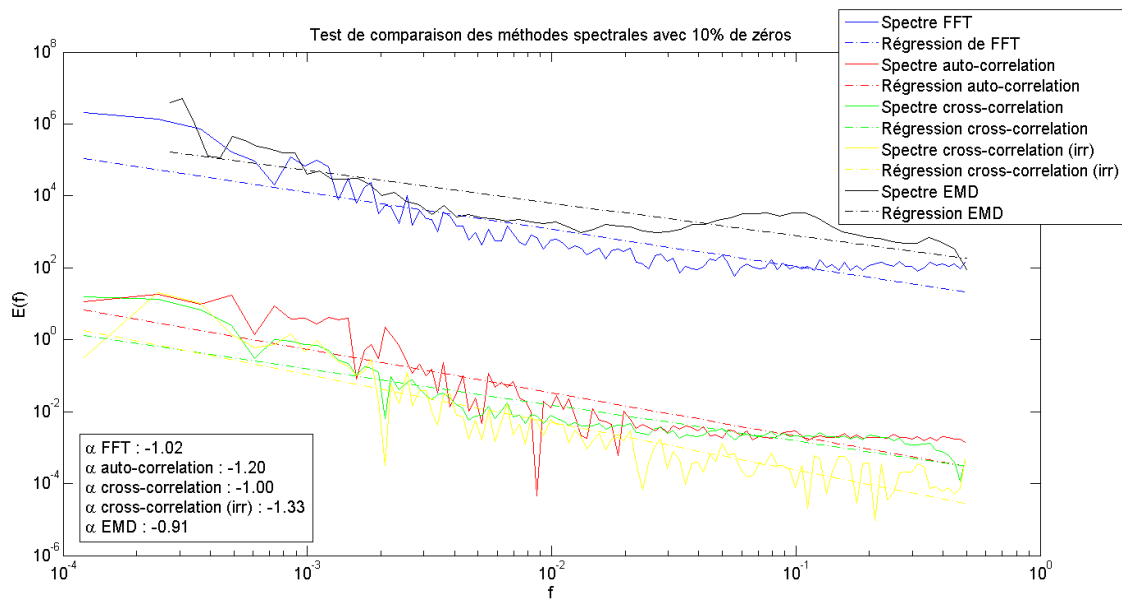


Figure 4-30. Comparaison de différentes méthodes spectrales réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 10% de zéros répartis de manière aléatoire. La correspondance entre les couleurs et les méthodes est la suivante : bleu FFT ; rouge auto-corrélation ; vert cross-corrélation; jaune cross-corrélation (irrégulière) ; noir EMD-HSA.

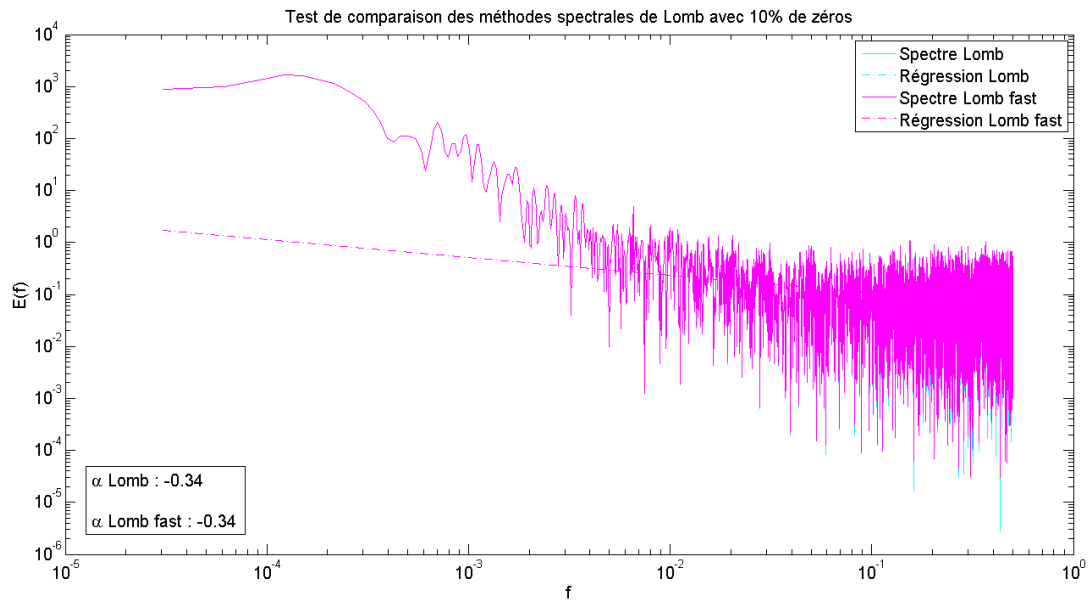


Figure 4-31. Comparaison des méthodes de Lomb classique (en cyan) et Fast Lomb (en magenta), réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 10% de zéros répartis de manière aléatoire.

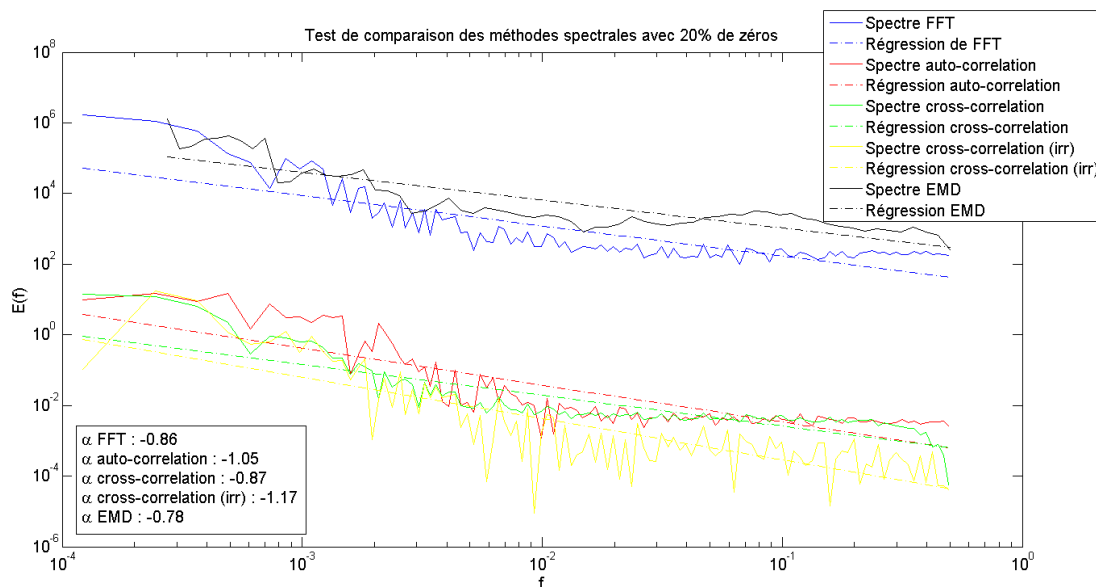


Figure 4-32. Comparaison de différentes méthodes spectrales réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 20% de zéros répartis de manière aléatoire. La correspondance entre les couleurs et les méthodes est la suivante : bleu FFT ; rouge auto-corrélation ; vert cross-corrélation; jaune cross-corrélation (irrégulière) ; noir EMD-HSA.

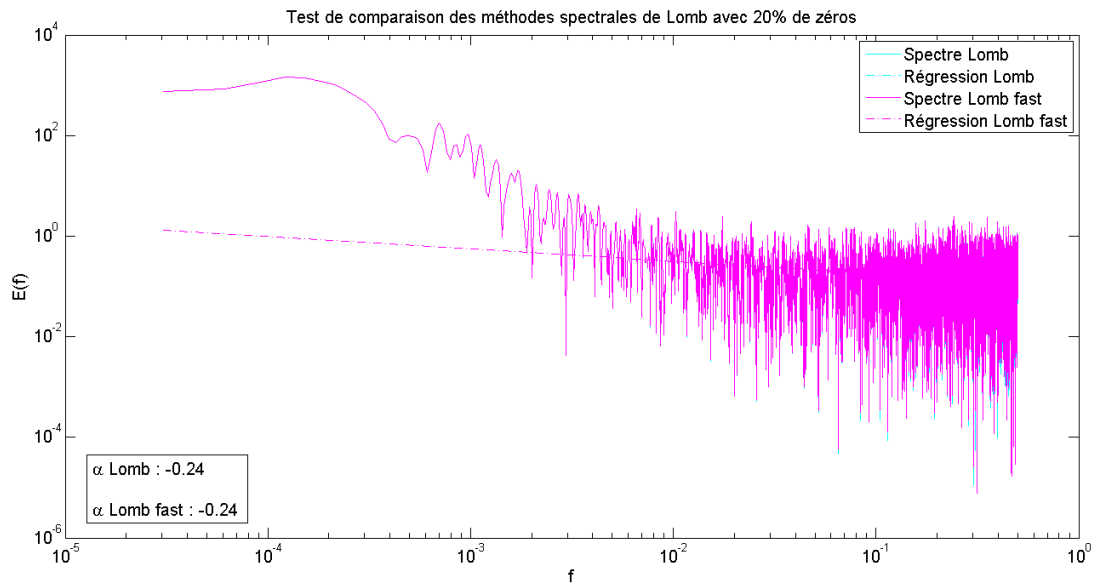


Figure 4-33. Comparaison des méthodes de Lomb classique (en cyan) et Fast Lomb (en magenta), réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 20% de zéros répartis de manière aléatoire.

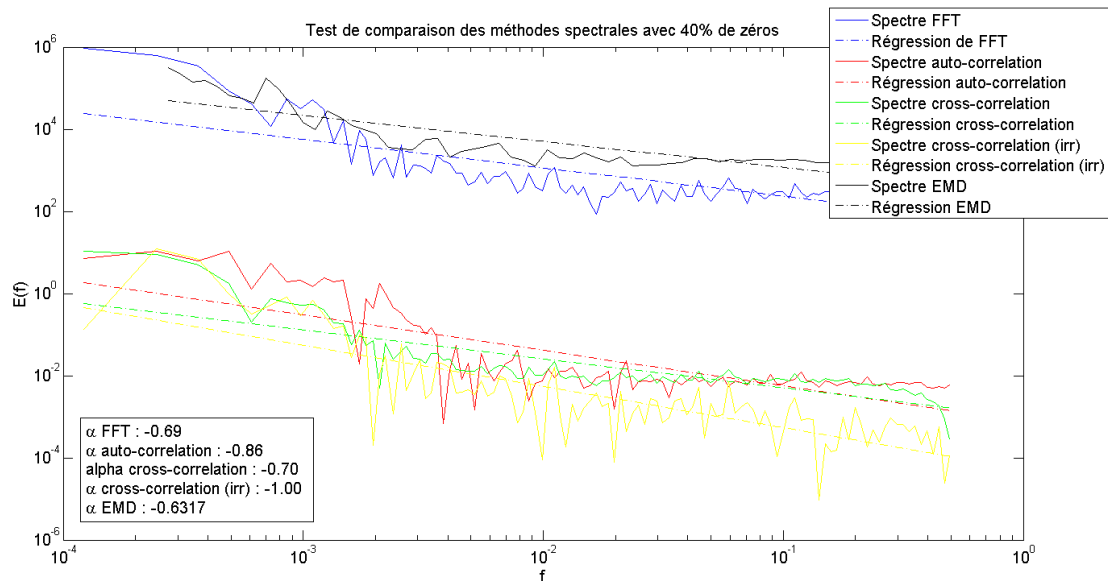


Figure 4-34. Comparaison de différentes méthodes spectrales réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 40% de zéros répartis de manière aléatoire. La correspondance entre les couleurs et les méthodes est la suivante : bleu FFT ; rouge auto-corrélation ; vert cross-corrélation ; jaune cross-corrélation (irrégulière) ; noir EMD-HSA.

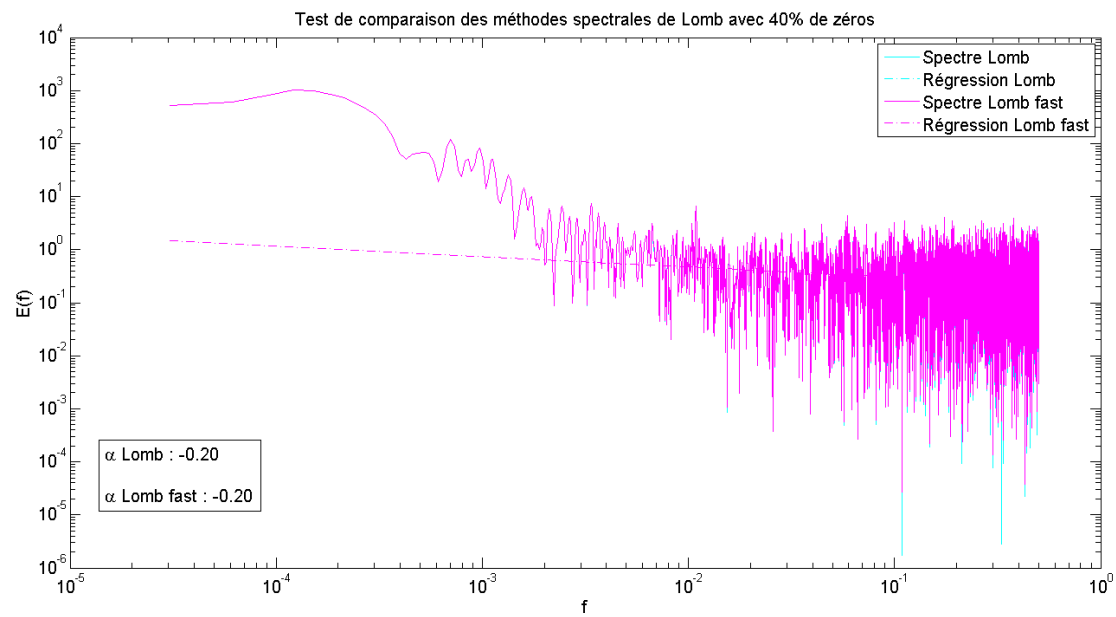


Figure 4-35. Comparaison des méthodes de Lomb classique (en cyan) et Fast Lomb (en magenta), réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 40% de zéros répartis de manière aléatoire.

Zéros repartie de manier aléatoire							
	α FFT	α auto-cor	α Cross	α Lomb	α Fast Lomb	α cross (irr)	α EMD
100% val	-1,96	-2,13	-2,09	-1,80	-1,80	-2,03	-1,95
95% val	-1,17	-1,35	-1,18	-0,47	-0,47	-1,50	-1,02
90% val	-1,02	-1,20	-1,00	-0,34	-0,34	-1,33	-0,91
80% val	-0,86	-1,05	-0,87	-0,24	-0,24	-1,17	-0,78
60% val	-0,69	-0,86	-0,70	-0,20	-0,20	-1,01	-0,63
Moyenne	-1,14	-1,32	-1,17	-0,61	-0,61	-1,41	-1,06
STD	0,49	0,49	0,54	0,67	0,67	0,39	0,52
Ecart	0,86	0,68	0,83	1,39	1,39	0,59	0,94

Tableau 4-3. Récapitulatif des pentes spectrales issues des tests réalisés avec les signaux dégradés : zéros répartis aléatoirement.

5.2.2 Tests avec périodes manquantes

Dans cette partie, on effectue nos tests avec un pourcentage croissant de valeurs manquantes réparties de manière aléatoire : 5% (voir figures 4-36 et 4-37) ; 10% (voir figures 4-38 et 4-39) ; 20% (voir figures 4-40 et 4-41) ; 40% (voir figures 4-42 et 4-43). Le tableau 4-4 consigne les résultats des analyses spectrales, on voit que les méthodes EMD-HSA et FFT sont les plus adaptées aux valeurs manquantes aléatoires ; avec dans les deux cas un écart aux pentes moyennes de 0,04 et des écart-type de 0,01. La méthode de cross-corrélation qui donnait la meilleure réponse dans le cas des périodes consécutives mises à zéros (voir partie 4.2.1), est beaucoup moins robuste à ce type de répartition aléatoire. Mais comme nous l'avons vu précédemment (voir partie 5.2.1) l'utilisation des zéros dans les séries temporelles pour combler les valeurs manquantes peut fortement biaiser les pentes spectrales. Les deux méthodes de Lomb donnent toujours un résultat très proche, avec une grande stabilité (écart-type faible), mais la présence d'un biais systématique de 0,20 semble se confirmer.

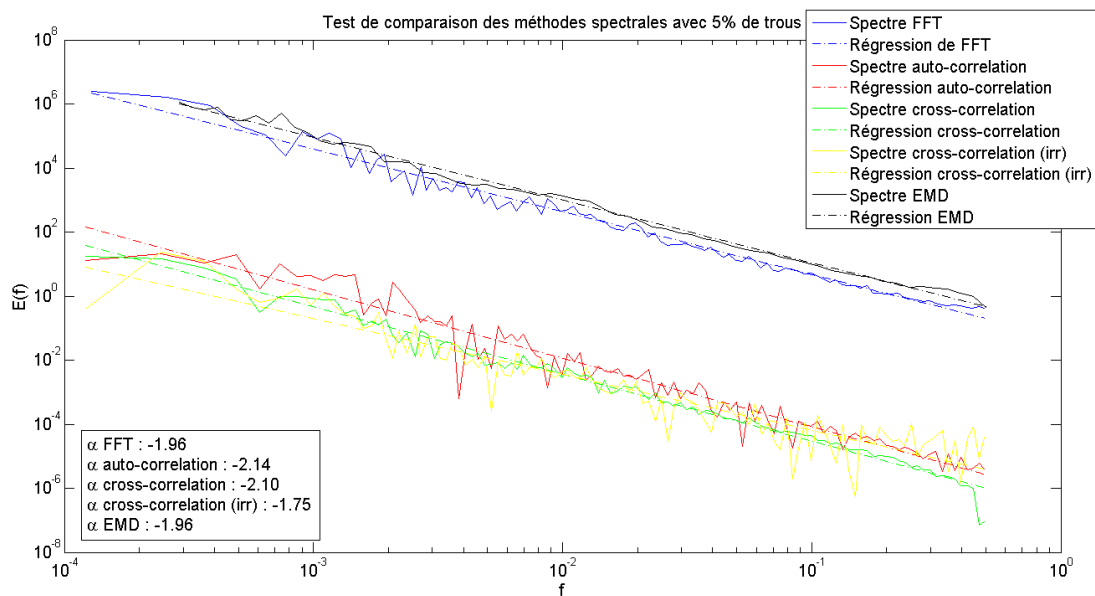


Figure 4-36. Comparaison de différentes méthodes spectrales réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 5% de périodes manquantes réparties de manière aléatoire. La correspondance entre les couleurs et les méthodes est la suivante : bleu FFT ; rouge auto-corrélation ; vert cross-corrélation; jaune cross-corrélation (irrégulière) ; noir EMD-HSA.

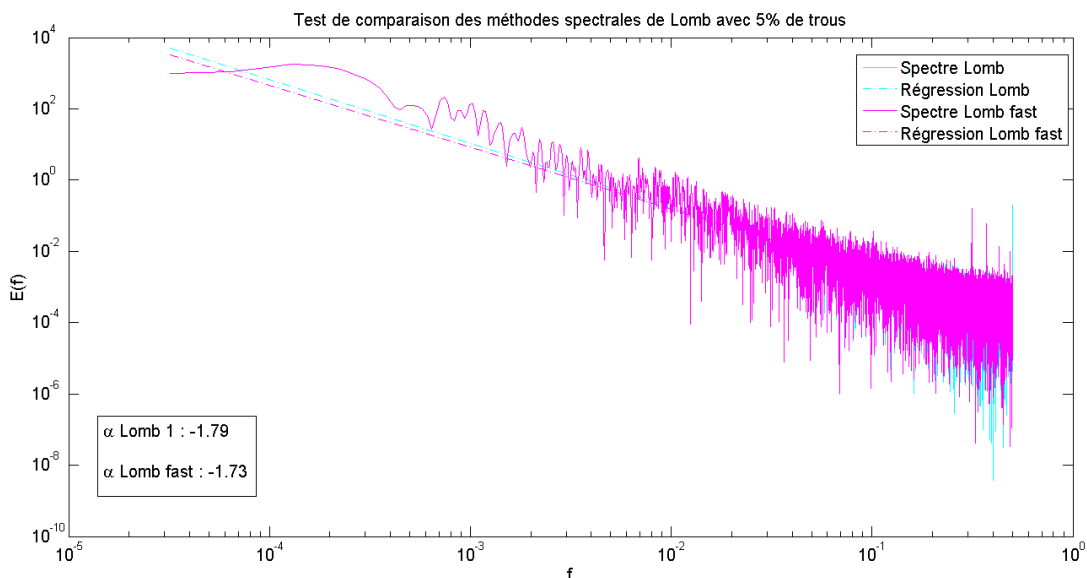


Figure 4-37. Comparaison des méthodes de Lomb classique (en cyan) et Fast Lomb (en magenta), réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 5% de périodes manquantes réparties de manière aléatoire.

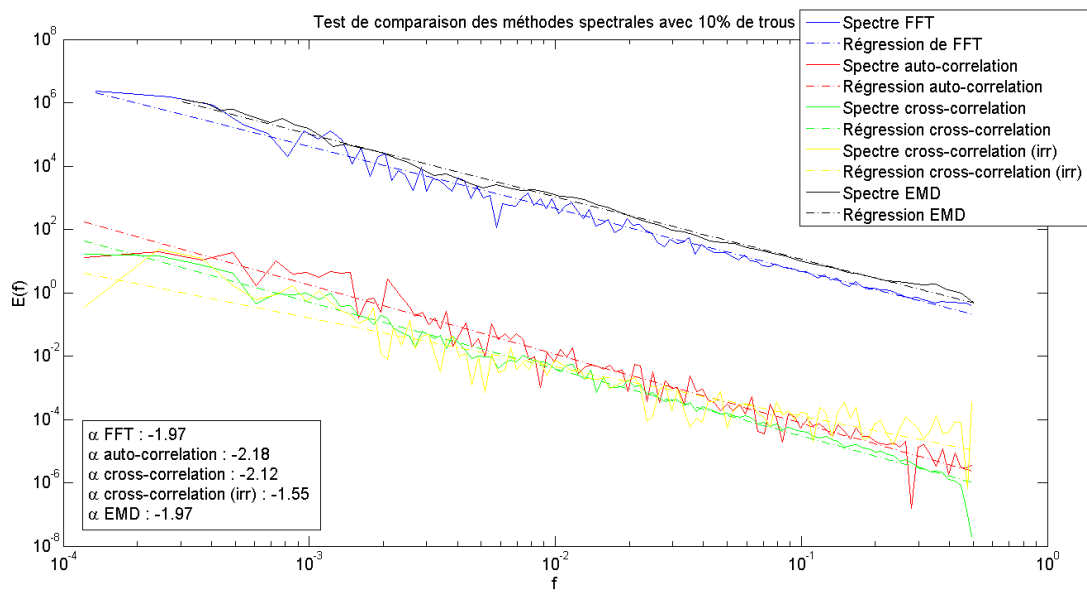


Figure 4-38. Comparaison de différentes méthodes spectrales réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 10% de périodes manquantes réparties de manière aléatoire. La correspondance entre les couleurs et les méthodes est la suivante : bleu FFT ; rouge auto-corrélation ; vert cross-corrélation; jaune cross-corrélation (irrégulière) ; noir EMD-HSA.

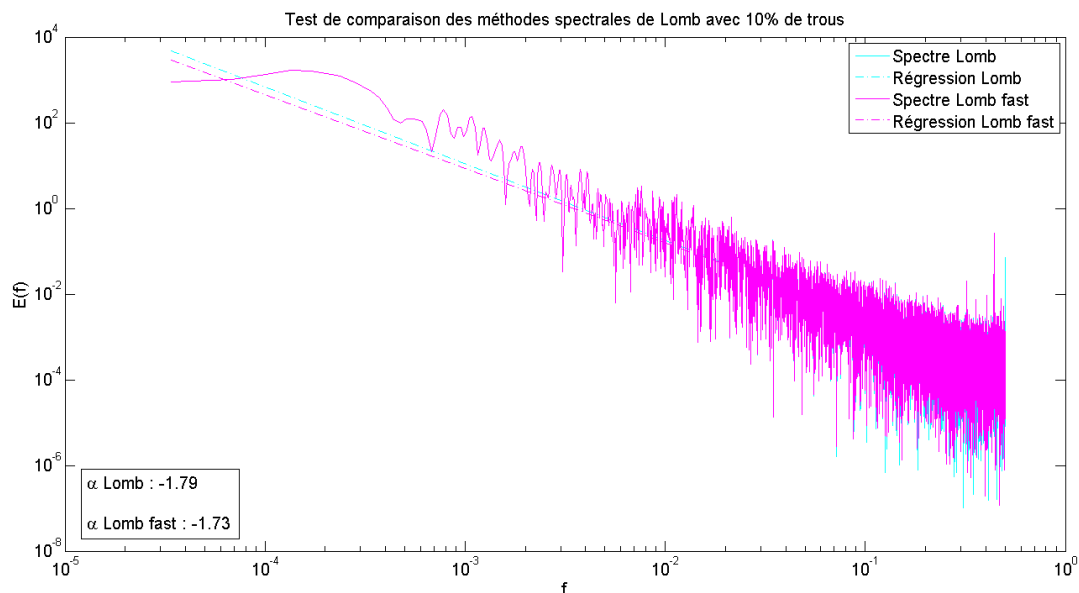


Figure 4-39. Comparaison des méthodes de Lomb classique (en cyan) et Fast Lomb (en magenta), réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 10% de périodes manquantes réparties de manière aléatoire.

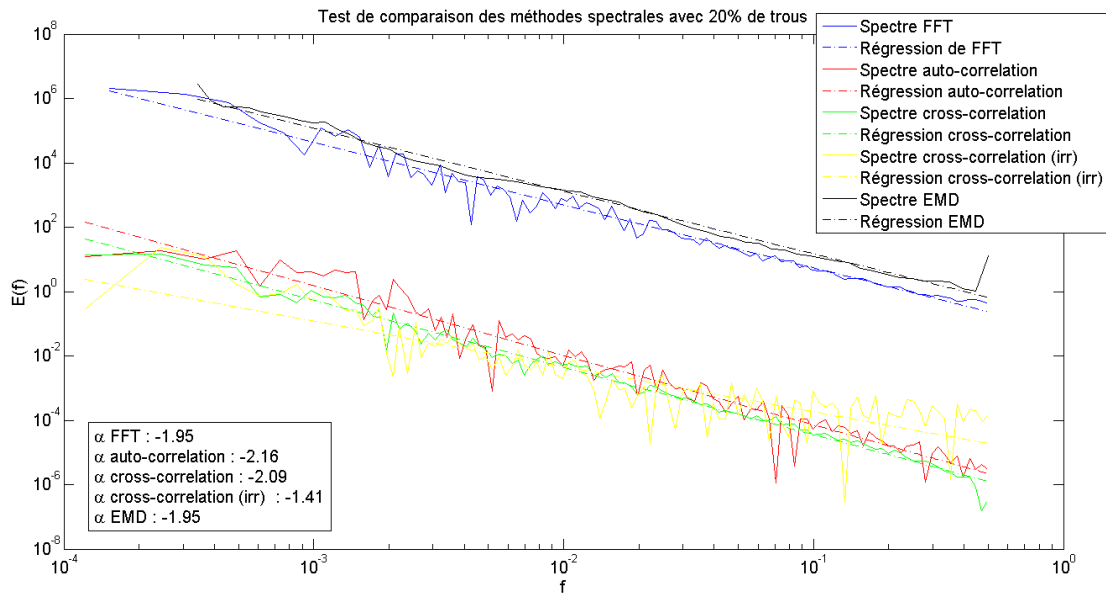


Figure 4-40. Comparaison de différentes méthodes spectrales réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 20% de périodes manquantes réparties de manière aléatoire. La correspondance entre les couleurs et les méthodes est la suivante : bleu FFT ; rouge auto-corrélation ; vert cross-corrélation; jaune cross-corrélation (irrégulière) ; noir EMD-HSA.

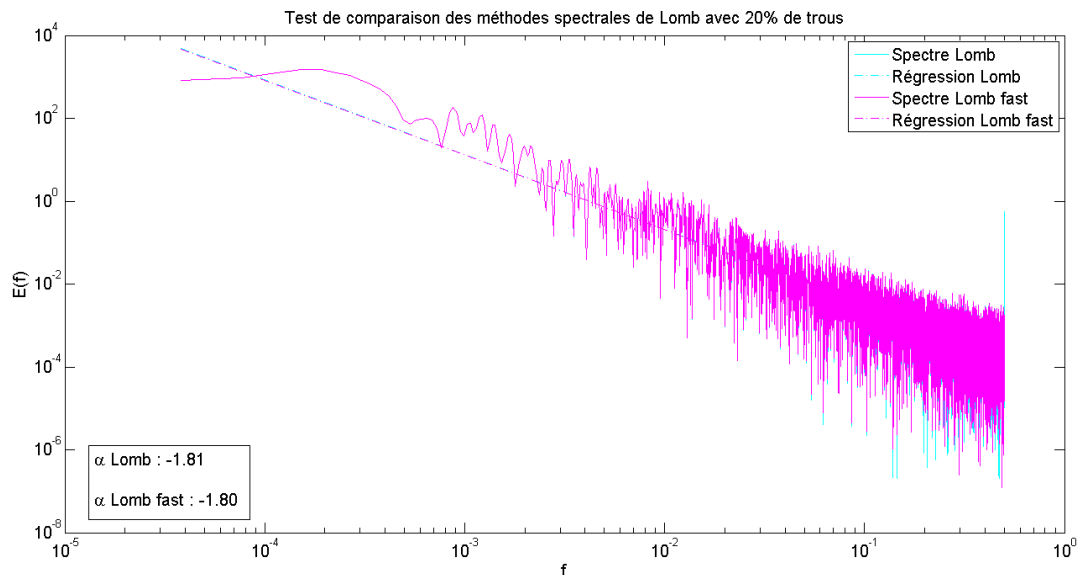


Figure 4-41. Comparaison des méthodes de Lomb classique (en cyan) et Fast Lomb (en magenta), réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 20% de périodes manquantes réparties de manière aléatoire.

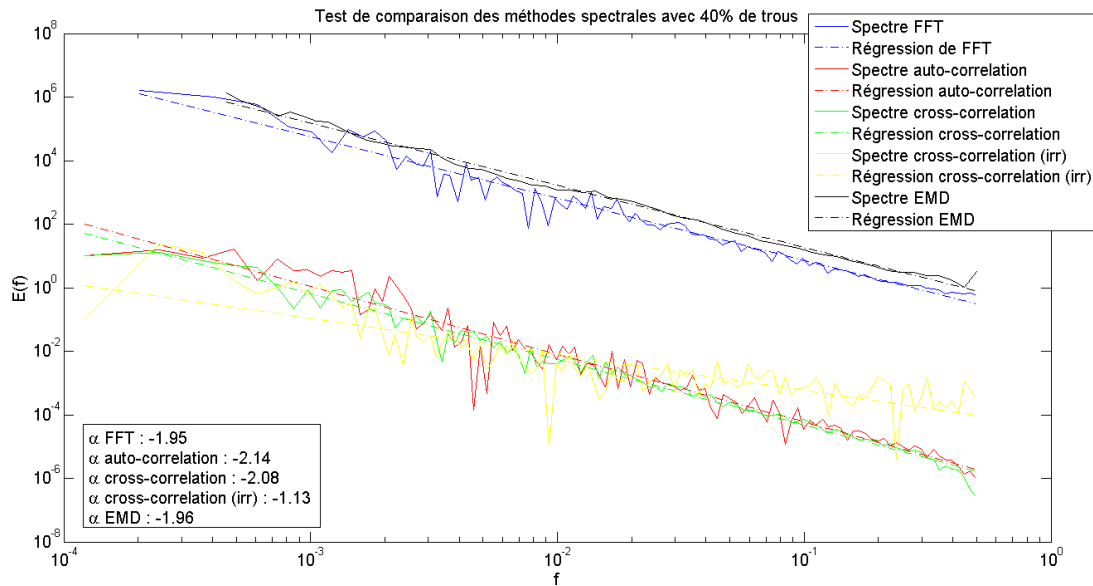


Figure 4-42. Comparaison de différentes méthodes spectrales réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 40% de périodes manquantes réparties de manière aléatoire. La correspondance entre les couleurs et les méthodes est la suivante : bleu FFT ; rouge auto-corrélation ; vert cross-corrélation; jaune cross-corrélation (irrégulière) ; noir EMD-HSA.

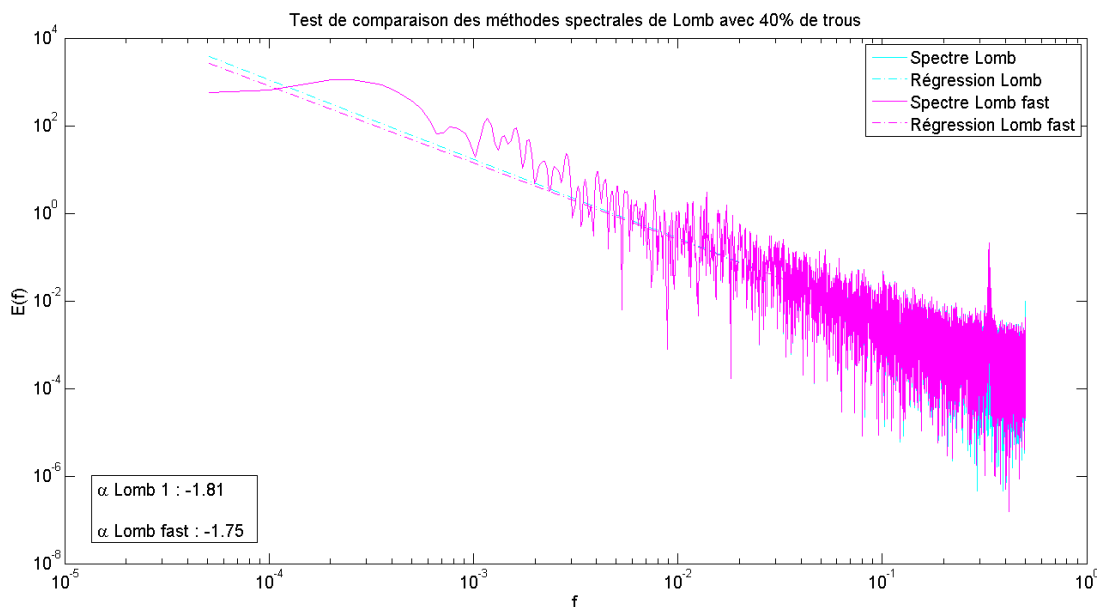


Figure 4-43. Comparaison des méthodes de Lomb classique (en cyan) et Fast Lomb (en magenta), réalisées sur un mouvement brownien dégradé avec 40% de périodes manquantes réparties de manière aléatoire.

Trous repartie de manier aléatoire							
	α FFT	α auto-cor	α Cross	α Lomb	α Fast Lomb	α cross (irr)	α EMD
100% val	-1,96	-2,13	-2,09	-1,80	-1,80	-2,03	-1,95
95% val	-1,96	-2,14	-2,10	-1,79	-1,73	-1,75	-1,96
90% val	-1,97	-2,18	-2,12	-1,79	-1,73	-1,55	-1,97
80% val	-1,95	-2,16	-2,09	-1,81	-1,80	-1,41	-1,95
60% val	-1,95	-2,14	-2,08	-1,81	-1,75	-1,13	-1,96
Moyenne	-1,96	-2,15	-2,09	-1,80	-1,76	-1,57	-1,96
STD	0,01	0,02	0,02	0,01	0,04	0,34	0,01
Ecart	0,04	0,15	0,09	0,20	0,24	0,43	0,04

Tableau 4-4. Récapitulatif des pentes spectrales issues des tests réalisés avec les signaux dégradés : périodes manquantes réparties aléatoirement.

6 Conclusion

Les deux méthodes de Lomb (classique et Fast) couramment utilisées en science de l'environnement pour répondre à la non-équidistance dans les jeux de données (Schulz and Stattegger, 1997, Fenoglio-Marc, 2001, Love and Rigler, 2014), sont effectivement très robustes. Elles présentent dans tout les cas des écart-types faibles, mais les résultats de nos tests mettent en avant un biais systématique d'environ 0,20. Il serait intéressant de pouvoir refaire des tests avec un mouvement brownien plus long en entrée, afin de voir si ce biais persiste. Dans le cas où ce biais tendrait à diminuer avec l'utilisation de bases de données plus importantes, la méthode Fast Lomb semble une bonne alternative avec des temps de calcul beaucoup moins importants que la méthode classique.

Les tests ici effectués ont été principalement séparés en deux parties : une partie teste la réponse aux périodes manquantes consécutives, et l'autre, aux valeurs réparties de manière totalement aléatoire. Dans la réalité, les séries temporelles comportent généralement des valeurs manquantes réparties sur des périodes consécutives (par exemple liées à la maintenance d'un système), ainsi que des valeurs

manquantes ponctuelles aléatoires. Il s'agit donc d'un composite des deux problématiques abordé par nos tests.

Nous avons aussi vu que le remplacement des ces valeurs manquantes par des zéros était à proscrire (voir partie 5.2.1). Donc dans le cas des tests réalisés avec uniquement des valeurs manquantes, qu'elles soient réparties consécutivement (voir partie 4.2.2) ou aléatoirement (voir partie 5.2.2), les méthodes EMD-HSA et FFT sont les plus précises. Or, mathématiquement, la transformée de Fourier requiert un pas de temps constant, ce qui n'est pas le cas de la méthode EMD. Dans ce cadre-là, nous avons choisi de favoriser l'utilisation de la méthode EMD-HSA pour les analyses spectrales réalisées dans cette thèse.

Annexe 2.

Dans cette annexe, nous avons incorporé l'article que nous avons soumis dans :
Journal of Marine Systems.

High frequency phytoplankton bloom dynamics in costal waters from an autonomous measurement system

J. Derot^{1,2}, F.G. Schmitt¹, V. Gentilhomme³, S.B. Zongo⁴

(1) Université du Littoral Côte d'Opale, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR LOG 8187, 32 av. Foch, 62930 Wimereux, France

(2) CNRS, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR LOG 8187, 28 av. Foch, 62930 Wimereux, France

(3) Université de Lille 1, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR LOG 8187, 28 av. Foch, 62930 Wimereux, France

(4) Université des Sciences et Technologie de Masuku, Faculté des Sciences, département de Biologie, BP: 943 Franceville, Gabon

Abstract page

In this paper high frequency fluorescence fluctuations recorded using an autonomous underwater monitoring at 20 minutes time resolution system are analyzed, from 2004 to 2011. Annual blooms are visible, superposed to multiscale fluctuations. The probability density function (pdf) of the fluorescence time series obeys a power law with slope -2. The pdf for annual portions obeys also power laws, with slopes which are related to the annual average. Empirical mode decomposition (EMD) is used to study the dynamics and display the power spectrum, which is different from the temperature power spectrum. EMD is also used to extract a trend and isolate the blooms from the high frequency dynamics.

Keywords: Phytoplankton blooms; Autonomous monitoring; Power spectra; EMD method; Probability density functions; Power laws; English Channel.

Introduction

[1] In the geosciences, fields and processes possess highly variable stochastic fluctuations on a large range of spatial and temporal scales, often superposed to more regular, deterministic variations associated with astronomical forcing, such as the annual, daily or tidal cycles. Here we focus on phytoplankton abundance, a quantity which plays an important role in aquatic ecosystems, and which possesses stochastic fluctuations as well as deterministic aspects linked with seasonal variations. Indeed phytoplankton growth is influenced by nutrients, temperature, and needs light, both fields having a strong annual cycle. In the Eastern English channel, the main species responsible of phytoplankton blooms is *Phaeocystis* (Schapira et al., 2008; Monchy et al., 2012). It has been shown to have impacts on the coastal ecosystem (Dauvin, 2008; Seuront and Vincent, 2008; Spilmont et al., 2009; Grattepanche et al. 2011). Several methods have been used to monitor the *Phaeocystis* abundance in this region, including in situ sampling (Grattepanche et al., 2011; Lefebvre et al., 2011; Houliez et al., 2013), ocean color inversion (Lubac et al., 2008), or automatic high frequency sampling (Zongo et al., 2011).

[2] We analyze here a time series recorded at a fixed coastal location, at high frequency (20 minutes intervals) during several years in the eastern English Channel (the French *La Manche*). This fixed buoy station can record various biogeochemical parameters simultaneously; we focus in this study on fluorescence data, proxy of phytoplankton abundance, and on other quantities that can be linked to its determinism: water temperature, nutrients concentration, light. Our objective is to have a better understanding of the fluorescence bloom dynamics: its probability distribution, its time-frequency distribution, its structuration in relation with other variables. The next section presents the material and methods: first the databases are presented, and then analyses methods are presented; the following section shows the results and the last one is a discussion and conclusion.

Material and methods

MAREL database

[3] The time series analyzed here belongs to the MAREL network (Automatic monitoring network for littoral environment, IFREMER, France), which is based on the deployment of moored buoys equipped with physico-chemical measuring devices, working in continuous and autonomous conditions (Berthome 1994; Woerther 1998; Blain et al. 2004; Zongo et al. 2011). These stations use automatic systems for seawater analysis and real time data transmission, and record several parameters, such as temperature, salinity, nutrients, dissolved oxygen, pH, and turbidity, with a fixed time resolution. Other time series from the MAREL network have been studied previously: Dur et al. (2007), Schmitt et al. (2008) and Zongo and Schmitt (2011) considered data recorded in the Seine estuary; Maneux et al. (2010), Sottolichio et al. (2011), Etcheber et al. (2011) and Lanoux et al. (2013) studied time series in the Gironde estuary, in relation to water quality monitoring and hypoxia studies. The measuring station used here, the MAREL Carnot station, is situated in the eastern English Channel in the coastal waters of Boulogne- sur-mer (France) at position 50.7404 N, 1.5676 W (Fig. 1) and records data with a 20 min resolution except the nutrients which are recorded with a periodicity of 12 hours (Zongo et al. 2011). Water depth at this position varies between 5 and 11 m; the measurements are done using a floating system inserted in a tube, 1.5 m below the surface. Previously, two studies have been published using this dataset: Zongo and Schmitt (2011) considered the scaling properties of pH fluctuations and Huang and Schmitt (2014) studied the cross-correlation between temperature and oxygen data. The MAREL Carnot buoy registers since 2004 more than fifteen physico-chemical parameters; Table 1 presents the parameters used in the present study, as well as their range and their incertitude.

[4] In this study we focus mainly on temperature and fluorescence data. Due to maintenance and failure of the automatic devices, many missing data are present in the series (Dur et al. 2007). The percentage for fluorescence is close to 80%, which represents 168948 data acquired, and for temperature it is close to 88%, which represents 138574 data acquired (see Table 1). Since we perform here analyses on an annual basis, we selected years from 2004 to 2011 (included).

[Figure 1 here]

[Table 1 here]

Probability density function estimation

[5] Since there are tens or even hundreds thousands data points, probability densities can be estimated using narrow intervals. In order to focus on all values, medium, large and extremes, we will display the probability density functions in log-log plots and compare experimental curves with theoretical ones, including lognormal and power-law curves. This is a direct and visual approach, complementary than statistical tests providing only a number.

Empirical mode decomposition

[6] We use Empirical Mode Decomposition (EMD) to extract the trend from time series, and Hilbert-Huang transform (HHT) to estimate power spectra. Empirical Mode Decomposition is a fully adaptive technique which has been proposed around 15 years ago, to study the nonlinear and nonstationary properties of time series (Huang et al. 1998; 1999; Frandrin et al. 2004). The main idea of EMD is to locally separate a given multiscale signal into a sum of a local trend and a local detail, respectively for a low frequency part and a high frequency part (Rilling et al. 2003). Here we give only the main idea of the method; for a complete description one can refer to Huang et al.

(1998), Flandrin et al. (2004) or more recently, for the spectral analyses, Huang et al. (2008, 2009) and Schmitt et al. (2009).

[7] The EMD method works as an algorithm which is data-driven and expresses a multiscale time series as the sum of a finite number of simpler time series, called modes: each mode is an oscillating time series having a zero mean and a characteristic time scale. The first mode corresponds to the high frequency and the larger the mode number, the lower the characteristic frequency. Empirically, multiscale time series of length N data points have $n = \log_2 N$ modes (Flandrin et al. 2004; Huang et al. 2008; Huang et al. 2009; Schmitt et al. 2009); hence here for 130 to 180 thousands data, there should be around 17 or 19 mode numbers. At the end of the decomposition algorithm, the original time series $X(t)$ is written as the sum of modes and a residual $r(t)$:

$$X(t) = \sum_{i=1}^n C_i(t) \quad (1)$$

[8] The smoothing of a time series, or the trend extraction, can be done by selecting a mode number n_0 corresponding to a given frequency above which the smoothing is performed. Hence the original time series can be written as a trend (smoothed version) and a high frequency term $x'(t)$:

$$X(t) = \bar{X}(t) + x'(t) \quad (2)$$

where the trend and high frequency write:

$$\begin{aligned}\bar{X}(t) &= \sum_{i=n_0}^n C_i(t) + r(t) \\ x'(t) &= \sum_{i=1}^{n_0-1} C_i(t)\end{aligned}\tag{3}$$

Hilbert Spectral Analysis

[9] The EMD method is useful to perform detrending and denoising. It has also been introduced as a preparation to a second step, Hilbert-Huang transform. This is done by the so-called “Hilbert Spectral Analysis” (HSA) (Huang et al. 1998). The Hilbert transform of each mode time series is estimated, and used to compute an analytical signal, i.e. a complex number whose real part is the mode and imaginary part the Hilbert transform of the mode. Then an instantaneous frequency and amplitude is computed from this analytical signal. The HSA is a time-amplitude frequency analysis technique; it means that at each time step, an amplitude and a frequency can be extracted, for each mode. By considering the full EMD-HSA method, one obtains at each time step, n instantaneous frequency and amplitude values (one value for each mode). The local energy is $A^2(\omega, t)$, where A is the amplitude and ω time, and a Hilbert power spectrum can be estimated as:

$$h(\omega) = \frac{1}{T} \int_1^T A^2(\omega, t) dt\tag{4}$$

where T is the time period to calculate the spectrum. This approach can be used to calculate power spectra using the HSA approach, which is similar to Fourier power spectra (Kantz & Schreiber 2004): it has been shown in Huang et al. (2008, 2009) that both Fourier and Hilbert power spectra have the same behavior for scaling processes. Fourier power spectra were used in previous studies in aquatic sciences for several decades (Platt & Denman 1975; Legendre & Legendre 1998; Seuront et al. 1996a,b,

1999, 2002; Winder & Cloern 2010); however here we estimate power spectra using the Hilbert approach, since the algorithm can be implemented for irregular data, including data with missing values.

Results

Statistics : climatology and probability density function

[10] Figure 2 shows the raw fluorescence and temperature data between 2004 and 2011, illustrating their multiscale and stochastic behavior. Figure 3 shows the climatology of temperature and fluorescence: the average inter-annual variations, estimated by averaging for each calendar day, $72 \times 8 = 576$ values. The temperature climatology is shown to illustrate the seasonal variability in this temperate climate: the average water temperature varies between 6-7 °C in winter and 18-19°C in summer, with a maximum temperature between 30 July and 20 September. Fluorescence data show more fluctuations and the average curve is less smooth; however the seasonal dynamics is still clear, and a bloom is found in average between days 70 and 150, hence between 10 March and 1 June. The maximum of fluorescence happens about 100 days before the beginning of the maximum temperature plateau.

[11] The fluorescence bloom statistics are studied by considering the PDF of the global data set, composed of 168948 data points over a total duration of 8 years. Figure 4 represents the PDF in log-log plot, showing the large range of values reached by this proxy of phytoplankton abundance. For values between 1 and 30, the log-log plot of the PDF is quasi-linear. A power-law fit of slope $\alpha=2$ for hyperbolic PDF of the form:

$$p(x) = Cx^{-\alpha} \quad (5)$$

is shown for comparison (C is a constant); only values above 30 do not follow this law. We also plot in the same figure a lognormal fit with the mean and standard deviation computed from the log-fluorescence data (mean = 37.8; standard deviation = 21.9). The lognormal fit is not bad, but clearly the power-law fit is closer to the data. Let us note that it is rather classical (without real justification) in marine biology to take the logarithm of abundance data, since these quantities display too huge fluctuations. Statistical tests are classically applied to the $\log(A+1)$ time series (Wang et al. 2006; Widdicombe et al. 2010; Feuchtmayr et al. 2012) where A is the abundance data (the value +1 is introduced to avoid the problem of $\log(0)$). It is clear that this corresponds to assume that the logarithm abundance is normally distributed, hence that the abundance has a lognormal PDF. This is thus a point to consider more closely: we plot in Figure 5 a lognormal graph for the fluorescence data. For a lognormal PDF this should be a straight line; it is visible that this is the case over only a limited range of values. Hence the lognormal hypothesis is not verified for the fluorescence data. The -2 power slope found here shows that the PDF is close to a Cauchy law.

[Figure 2 here]

[Figure 3 here]

[Figure 4 here]

[Figure 5 here]

Multivariate analysis

[12] Figure 2 showed that the bloom intensity is quite variable according to the year. If the bloom mechanism is partly understood — it needs nutrients, spring increasing temperatures, a good turbulence level (Steele et al. 2010) — the precise mechanism is still not understood and the reason of high or low blooms years is still unknown. Here we try to statistically analyze some relations with the objective to know more about this determinism. We consider annual portions of the fluorescence data, and study various covariations between measured quantities.

[13] In order to estimate globally which quantity has the most influence on the fluorescence dynamics, we first used principal component analysis (PCA). The variables introduced were fluorescence, temperature, photosynthetically available radiations (PAR), silicates, phosphates, and nitrates. Figure 6 shows a PCA in three dimensions, to show the 3 principal components. In each case fluorescence and temperature are always very close. This means there is probably a close relationship between these two parameters. The light available (PAR) comes second and seems to have some relation with the fluorescence. Concerning nutrients, silicates and nitrates seem to have less relationship with the fluorescence, whereas the phosphates are close to fluorescence, especially when we are considering the components 3 and 1.

[14] Following the PCA indications, we have first considered a possible temperature influence on the bloom magnitude. An earlier study in the same area has proposed that low winter temperatures are associated with low bloom intensities (Gomez and Souissi 2008). In order to check this, we plotted in Figure 7 the mean annual fluorescence (which is dominated by the bloom) versus the mean winter temperature of the previous winter. There is some variability and only 8 points, but a trend is visible, with higher winter temperatures associated with lower bloom intensity, hence a relation which is the inverse of the one suggested in Gomez and Souissi (2008).

[15] Phytoplankton growth needs nutrients; the spring availability of the nutrients is a prerequisite for bloom initiation, and we check here if nutrients abundance is directly related to the bloom magnitude. Figure 8 shows the mean fluorescence versus nutrients abundance (nitrates, silicates and phosphates) and Figure 9 shows the mean fluorescence versus PAR. The means of PAR and nutrients are compared with annuals fluorescence means of the same year, unlike the figure 7. For PAR data (Fig 9) the mean value is computed for daily data: a threshold is applied to remove measurements during the night. In this figure, PAR as well as fluorescence are considered only during the bloom periods. Silicates and nitrates do not appear to have

direct influence on the bloom. Concerning phosphates and PAR, we found a correlation coefficient similar to the one between fluorescence and temperature data (Fig7). Therefore, the temperature, phosphates and PAR seem to have an impact on the fluorescence; these results are consistent with the observations made on the figure 6.

[Figure 6 here]

[Figure 7 here]

[Figure 8 here]

[Figure 9 here]

Structuration and bloom relations

[16] Here we check if the annual abundance is linked with the structuration of the data during the same year. Figure 10 shows the PDF estimated on a yearly basis on the fluorescence data. It shows that the power-law fit is always quite good, except for 2005 where the range is still here but narrower than the other years. We estimate the slope α for each year from Equation (5), which is not 2 anymore, but varies between 1.2 and 2.3. This exponent characterizes the structuration of the data: the lower the slope, the more large values will be present relatively to the other ones, the more intermittent the distribution, with many extremes. Figure 11 shows the mean fluorescence value versus the slope α , indicating a general decrease: the slope is smaller for larger values of the mean abundance. It indicates that there is globally a larger heterogeneity or intermittency when blooms are more important: larger blooms have larger fluctuations.

[Figure 10 here]

[Figure 11 here]

Data filtering and power spectral analysis using EMD

[17] Here we apply the EMD method on the fluorescence and temperature series. There are respectively 20 and 17 modes and a trend. Each mode has a mean time scale; the mean scales of the first 14 modes are shown in Figure 12, versus the mode number. There is an exponential increase, corresponding to a quasi-dyadic decomposition. As expected, the first modes correspond to the smallest time scales, and the larger the mode number, the larger the mean scale. We have chosen to filter the data using mode $n_0=12$, having a mean of 5.07 days. Figure 13 shows for the year 2006, the raw fluorescence data, the large scale part corresponding to the sum of modes 13 to 20 and the trend, and below, the high frequency part (sum of modes 1 to 11). This approach helps to display more clearly the dynamics, and show more clearly the beginning and end of the bloom. However, it must be noted that the high frequency fluctuations of the fluorescence data during the bloom are not a noise that should be removed; it is a high frequency signal, showing that bloom dynamics is quite specific, with high frequency oscillations that recall out of equilibrium systems, such as e.g. earthquakes. We have seen earlier that larger blooms have more intermittent fluctuations (they are more heterogeneous): the latter are here visible using EMD filtering. Only high frequency monitoring can detect such behavior, which is new to our knowledge, and which is certainly a point to investigate further.

[18] We now consider dynamical information from these high frequency time series using the EMD-HSA approach to estimate power spectra for fluorescence and temperature. The spectra are of the power-law form:

$$h(\omega) \approx \omega^{-(1+\beta)} \quad (6)$$

Where β is the power-law scaling exponent which is 0 for a noise, 2 for a Brownian motion and 5/3 for turbulence (Huang et al. 2008). Figure 14 shows that there is a

slope of 1.75 for temperature, and 1.24 for fluorescence. The value for temperature is close to $5/3$ expected for fully developed turbulence (Kolmogorov 1941, Obhukov 1949, Frisch 1995). We can also see a slight peak close to 12 hours, which is probably related to the impact of day/night cycles on photosynthetic mechanisms inherent in phytoplankton biomass. Such power law property and slope values were already reported in earlier studies (Zongo and Schmitt 2011; Huang and Schmitt 2014) but with less data for the fluorescence time series.

[19] Power spectra reveal some dynamical structuration, whereas the PDF are related to statistical structuration (with no time information). We have seen in figure 7 that there is a link between winter temperatures and the fluorescence. For continuing along the same line, we have considered the relation between the spectral slope β of the temperature during winter time and fluorescence. Fig 15a represents β versus α , the fluorescence hyperbolic slope of the year following the winter temperature. Here the winter temperature is the 3 coldest months of the year (meteorological winter). A clear global trend can be found ($R^2=0.88$), indicating that the more intermittent years (low value of α) are associated in average with lower spectral slopes. The spectral slope is also an indicator of time structuration: the lower the Hurst index (for fractional Brownian motion we have $H=((\beta-1)/2)$), the less data are persistent and the larger their heterogeneity. Such relation may indicate that larger time structuration and fluctuations in winter temperature, give rise to larger intensity intermittency in fluorescence data during the following year. Figure 15b represents the same β (for winter temperature) versus the same fluorescence annual mean during the next bloom following this winter. There is still a relation, but less clear than found in Fig15a: high β values are associated with lower fluorescence. Figure 11 and 15a are of course fully consistent with figure 15b.

[Figure 12 here]

[Figure 13 here]

[Figure 14 here]

[Figure 15 here]

Discussion and conclusion

[20] High frequency sampling at fixed location have been recognized to be useful for studying the variability of oceanic quantities at many different scales (Dickey 1991; Dickey et al. 1993; Chavez et al. 1997; Chang & Dickey 2001; Bensoussan et al. 2004; Nam et al. 2005; Dur et al. 2007). In recent years such automated systems which record data at fixed-point, are being democratization in coastal areas. They are being installed in many places in the world, such as Venice (Lovato et al. 2013) South Korea (Nam et al. 2005), or California (Frieder et al. 2011). These automated fixed-point systems are essential to better understand the complex mechanisms present in the coastal ecosystem.

[21] Phytoplankton is a crucial element in the marine ecosystems and its dynamics is subject to numerous multiscale forcings which brings a great heterogeneity (Ritchie 2009; Turchin 2003). The abundance data such as the present time series tend to have many important fluctuations (Blarer and Doebeli 1999), hence the importance of using high frequency data in order to detect and study their localized bursty dynamics. It is, therefore, important to use numerical tools adapted to these high frequency data sets, and also to the study of these systems subject to strong fluctuations.

[22] Such automatic high frequency sampling generates datasets with large number of values (here several thousand), and hence precise PDF can be estimated. We have shown the global fluorescence PDF and precisely estimated its extremes, showing that while the lognormal model is not too far from the data, it is still not convenient and phytoplankton abundance here does not obey a lognormal law. Such law is often assumed (Wang et al. 2006; Tsirtsis et al 2008; Widdicombe et al. 2010; Feuchtmayr et al. 2012; Segura et al. 2013), but it has also been questioned (Nummelin

1998; Williamson 2005). With a precise plot of the PDF, we have shown here that a Cauchy law (characterized by a hyperbolic slope of $\alpha=2$) is closer to the data. Such relation remains to be tested on other fluorescence time series to access its potential universality.

[23] Concerning the bloom determinism and its relation with various forcing, we have shown here that temperature, available light and phosphate, have some direct relation with the fluorescence abundance. First of all we found that winter temperature has influence on the bloom intensity: low winter temperature give rise to large blooms in the next spring. This could be related to stratification: for winters with low temperature, the spring temperature increase could create a larger stratification giving a larger bloom. Also, as expected, available light is directly linked to bloom intensity. Such relation is not surprising and consistent with current knowledge. Finally we found an inverse relationship between phosphate abundance and bloom intensity.

[24] Looking more precisely, at an annual scale, on the relationship between the mean annual fluorescence value and hyperbolic PDF slope of fluorescence (Fig 11), we found that larger blooms have larger fluctuations. This showed that bloom events are not smooth mountain-like, but due to turbulent advection and complex population dynamics, bloom episodes display high frequency oscillations. Such oscillations were visible using EMD to separate a trend and fluctuation (Fig 13). This method can be used on high frequency data with missing values, and is useful to detrend time series and extract local high frequency fluctuation from trends. It can also be used to estimate power spectra from irregular data, a way to analyze the dynamics and locally to extract amplitude and frequency information. It was used here to relate the time structuration of winter temperature (through its spectral slope) to the intensity structuration of fluorescence. The high correlation which is found has presently no mechanistic explanation; however it can be used to perform predictions on the intensity and structure of the bloom in spring, based on previous winter temperature records.

[25] Phytoplankton bloom dynamics is complex, related to many different forcing and parameters, though nonlinear and stochastic relations. Their dynamics belongs to many different scales and high frequency measurements are needed to extract and study such fields. Here high frequency monitoring multi-parameter data have been used to study phytoplankton bloom at high frequency. Several laws have been found. Their universality remains to be assessed. However the methodological usefulness of the approaches proposed here is likely to be universal.

Acknowledgements

Ifremer is acknowledged for access to MAREL data⁵; we thank Alain Lefebvre and Michel Repecaud from IFREMER for discussions. Yongxiang Huang is thanked for discussions on the EMD method. Figure 1 is constructed by Denis Marin (LOG).

⁵<http://wwz.ifremer.fr/manchemerdunord/Environnement/LER-Boulogne-sur-Mer/Surveillance-et-Observation/MAREL-Carnot>

References

- Bensoussan, N., J.-C. Romano, B. El-Haikali, and M.-G. Lafont. 2004. Importance du choix des échelles de temps pertinentes pour l'étude du fonctionnement d'écosystèmes marins littoraux. *C. R. Geoscience*. **336**: 909-918, <http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2004.02.013>.
- Berthome, J. P. 1994. MAREL: un réseau automatisé de veille pour l'environnement littoral. *Equinoxe*. **47-48**: 34-35.
- Blain, S., J. Guillou, P. Tréguet, P. Woerther, L. Delauney, E. Follenfant, O. Gontier, M. Hamon, B. Leildé, A. Masson, C. Tartu, and C. Vuillemin. 2004. High frequency monitoring of the coastal environment using the Marel buoy. *J. Environ. Monitor*. **6**: 569-575, doi:10.1039/B314073C.
- Blarer, A., and M. Doebeli. 1999. Resonance effects and outbreaks in ecological time series. *Ecol. Lett.* vol. 2.
- Chang, G. C., and T. D. Dickey. 2001. Optical and physical variability on timescales from minutes to the seasonal cycle on the New England shelf: July 1996 to June 1997. *J. Geophys. Res.* **106**: 9435– 9453, doi:10.1029/2000JC900069.
- Chavez, F. P., J. T. Pennington, R. Herlien, H. Jannasch, G. Thurmond, and G. E. Friederich. 1997. Moorings and drifters for real-time interdisciplinary oceanography. *J. Atmos. Ocean. Tech.* **14**: 1199–1211.
- Dauvin, J. C. 2008. The main characteristics, problems and prospects for Western European coastal seas. *Mar. Pollut. Bull.* **57**: 22-40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.10.016>
- Dickey, T. D. 1991. The emergence of concurrent high resolution physical and bio-optical measurements in the upper ocean and their applications. *Rev. Geophys.* **29**: 383–413, doi: 10.1029/91RG00578.

- Dickey, T. D., R. H. Douglass, D. Manov, D. Bogucki, P. C. Walter, and P. Petrelis. 1993. An experiment in two way communication with a multivariable moored system in coastal waters. *J. Atmos. Ocean. Tech.* **10**: 637–644. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426\(1993\)010<0637:AEITWC>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426(1993)010<0637:AEITWC>2.0.CO;2)
- Dur, G., F.G. Schmitt, and S. Souissi. 2007. Analysis of high frequency temperature time series in the Seine estuary from the Marel autonomous monitoring buoy. *Hydrobiologia*. **588**: 59-68, doi:10.1007/s10750-007-0652-3.
- Etcheber, H., S. Schmidt, A. Sottolichio, E. Maneux, G. Chabaux, J.-M. Escalier, H. Wennekes, H. Derriennic, M. Schmeltz, L. Quémener, M. Repecaud, P. Woerther, and P. Castaing. 2011. Monitoring water quality in estuarine environments: lessons from the MAGEST monitoring program in the Gironde fluvial-estuarine system. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **15**: 831–840.
- Feuchtmayr, H., S. J. Thackeray, I. D. Jones, M. De Ville, J. Fletcher, B.E.N. James, and J. Kelly. 2012. Spring phytoplankton phenology—are patterns and drivers of change consistent among lakes in the same climatological region?. *Freshwater Biol.* **57(2)**: 331-344, doi:10.1111/j.1365-2427.2011.02671.x.
- Flandrin, P., G. Rilling, and P. Goncalves. 2004. Empirical mode decomposition as a filter bank. *IEEE. Signal. Proc. Let.* **11(2)**: 112-114, doi:10.1109/LSP.2003.821662.
- Frieder, C. A., S. H. Nam, T. R. Martz, and L. A. Levin. 2012. High temporal and spatial variability of dissolved oxygen and pH in a nearshore California kelp forest. *Nonlinear. Proc. Geophys.* **9**: 3917-3930.
- Frisch, A. S., D. H. Lenschow, C. W. Fairall, W. H. Schubert, and J. S. Gibson. 1995. Doppler radar measurements of turbulence in marine stratiform cloud during ASTEX. *J. Atmos. Sci.* **52(16)**: 2800-2808, [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1995\)052<2800:DRMOTI>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052<2800:DRMOTI>2.0.CO;2)

- Gomez, F., and S. Souissi. 2008. The impact of the 2003 summer heat wave and the 2005 late cold wave on the phytoplankton in the north-eastern English Channel. *C. R. Biol.* **331(9)**: 678-685, <http://dx.doi.org/10.1016/j.crv.2008.06.005>.
- Grattepanche, J. D., E. Breton, J. M. Brylinski, E. Lecuyer, and U. Christaki. 2011. Succession of primary producers and micrograzers in a coastal ecosystem dominated by *Phaeocystis globosa* blooms. *J. Plankton. Res.* **33(1)**: 37-50, [doi:10.1093/plankt/fbq097](http://dx.doi.org/10.1093/plankt/fbq097).
- Houliez, E., F. Lizon, L. F. Artigas, S. Lefebvre, and F. G. Schmitt. 2013. Spatio-temporal variability of phytoplankton photosynthetic activity in a macrotidal ecosystem (the Strait of Dover, eastern English Channel). *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* **129**: 37-48, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2013.06.009>.
- Huang, N. E., Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, ... and H. H. Liu. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. Math. Phys. Eng. Sci.* **454(1971)**: 903-995, [doi:10.1098/rspa.1998.0193](http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1998.0193).
- Huang, N. E., Z. Shen, and S. R. Long. 1999. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert Spectrum 1. *Annu. Rev. Fluid. Mech.* **31(1)**: 417-457, [doi:10.1146/annurev.fluid.31.1.417](http://dx.doi.org/10.1146/annurev.fluid.31.1.417).
- Huang, Y. X., F. G. Schmitt, Z. M. Lu, and Y. L. Liu. 2008. An amplitude-frequency study of turbulent scaling intermittency using Empirical Mode Decomposition and Hilbert Spectral Analysis. *Europhys. Lett.* **84(4)**: 40010, [doi:10.1209/0295-5075/84/40010](http://dx.doi.org/10.1209/0295-5075/84/40010).
- Huang, Y., F. G. Schmitt, Z. Lu, and Y. Liu. 2009. Analysis of daily river flow fluctuations using empirical mode decomposition and arbitrary order Hilbert spectral analysis. *J. Hydrol.* **373(1)**: 103-111, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.015>.

- Huang, Y., and F. G. Schmitt. 2014. Time dependent intrinsic correlation analysis of temperature and dissolved oxygen time series using empirical mode decomposition. *J. Mar. Syst.* **130**: 90-100, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.06.007>.
- Kantz, H., and T. Schreiber. 2004. *Nonlinear time series analysis* (Vol. 7). Cambridge University Press.
- Kolmogorov, A.N. 1941. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds number. *Dokl. Akad. Nauk SSSR.* **30**: 9-3.
- Lanoux, A., H. Etcheber, S. Schmidt, A. Sottolichio, G. Chabaud, M. Richard, and G. Abril. 2013. Factors contributing to hypoxia in a highly turbid, macrotidal estuary (the Gironde, France). *Environ. Sci. Process. Impacts.* **15**: 585-595, [doi:10.1039/C2EM30874F](https://doi.org/10.1039/C2EM30874F).
- Lefebvre, A., N. Guiselin, F. Barbet, and F. L. Artigas. 2011. Long-term hydrological and phytoplankton monitoring (1992–2007) of three potentially eutrophic systems in the eastern English Channel and the Southern Bight of the North Sea. *ICES J. Mar. Sci.* **68(10)**: 2029-2043, [doi:10.1093/icesjms/fsr149](https://doi.org/10.1093/icesjms/fsr149).
- Legendre, P., and L. Legendre. 2012. *Numerical Ecology* (vol.20). Elsevier.
- Lovato, T., S. Ciavatta, D. Brigolin, A. Rubino, and R. Pastres. 2013. Modelling dissolved oxygen and benthic algae dynamics in a coastal ecosystem by exploiting real-time monitoring data. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* **119**: 17-30, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2012.12.025>.
- Lubac, B., H. Loisel, N. Guiselin, R. Astoreca, F. L. Artigas, and X. Mériaux. 2008. Hyperspectral and multispectral ocean color inversions to detect *Phaeocystis globosa* blooms in coastal waters. *J. Geophys. Res-Oceans.* **(1978–2012)**: 113(C6), [doi:10.1029/2007JC004451](https://doi.org/10.1029/2007JC004451).
- Monchy, S., J. D. Grattepanche, E. Breton, D. Meloni, G. Sancier, M. Chabé, ... and U. Christaki. 2012. Microplanktonic community structure in a coastal system

- relative to a *Phaeocystis* bloom inferred from morphological and tag pyrosequencing methods. *PloS ONE*. **7(6)**: e39924, doi:10.1371/journal.pone.0039924.
- Maneux, E., P. Castaing, G. Chabaux, J. M. Escalier, H. Etcheber, M. Schmeltz, S. Schmidt, A. Sottolichio, and P. Woerther. 2010. MAGEST: Surveillance en continu pour la connaissance de la qualité des eaux de l'estuaire de la Gironde. Actes Journées Nationales Génie Côtier–Génie Civil Edition. **11**: 521-528.
- Nam, S.H., G. Kim, K.R. Kim, K. Kim, L. Oh, K.W. Kim, H. Ossi, and Y.G. Kim. 2005. Application of real-time monitoring buoy systems for physical and biogeochemical parameters in the coastal ocean around the Korean peninsula. *J. Mar. Sci. Technol.* **39**:54-64.
- Nummelin, M. 1998. Log-normal distribution of species abundances is not a universal indicator of rain forest disturbance. *J. Appl. Ecol.* **35(3)**: 454-457.
- Obukhov, A. M. 1949. Structure of the temperature field in the turbulent flow. *Izv. Akad. Nauk. S.S.S.R., Geogr. I. Jeofiz.* **13**: 58–69.
- Platt, T., and K.L. Denman. 1975. Turbulence structure function in turbulent shear flows. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **6**: 189-210.
- Rilling, G., P. Flandrin, and P. Goncalves. 2003. On empirical mode decomposition and its algorithms. In *IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing NSIP*. **3**: 8-11.
- Ritchie, M. E. 2009. Scale, heterogeneity, and the structure and diversity of ecological communities. Princeton University Press.
- Sathyendranath S., and T. Platt. 2010. Primary production distribution. Pp. 105-110. *In* Steele, J. H., S. A. Thorpe, and K. K. Turekian [Eds.], *Ocean Currents: A derivative of the encyclopedia of Ocean Sciences*. Academic Press.
- Schapira, M., D. Vincent, V. Gentilhomme, and L. Seuront. 2008. Temporal patterns of phytoplankton assemblages, size spectra and diversity during the wane of a

- Phaeocystis globosa spring bloom in hydrologically contrasted coastal waters. J. Mar. Biol. Assoc. UK. **88(04)**: 649-662.
- Schmitt, F.G., G. Dur, S. Souissi, and S. Zongo. 2008. Statistical properties of turbidity, oxygen and pH fluctuations in the Seine river estuary (France). Physica A. **387**: 6613-6623.
- Schmitt, F. G., Y. Huang, Z. Lu, Y. Liu, and N. Fernandez. 2009. Analysis of velocity fluctuations and their intermittency properties in the surf zone using empirical mode decomposition. J. Mar. Syst. **77(4)**: 473-481.
- Segura, A. M., D. Calliari, H. Fort, and B. L. Lan. 2013. Fat tails in marine microbial population fluctuations. Oikos. **122(12)**: 1739-1745.
- Seuront, L., F.G. Schmitt, D. Schertzer, Y. Lagadeuc, and S. Lovejoy. 1996. Multifractal intermittency of eulerian and Lagrangian turbulence of ocean temperature and plankton fields. Nonlin. Processes Geophys. **3**: 236-246.
- Seuront, L., F. G. Schmitt, Y. Lagadeuc, D. Schertzer, S. Lovejoy, and S. Frontier. 1996. Multifractal analysis of phytoplankton biomass and temperature in the ocean. Geophys. Res. Lett. **23(24)**: 3591-3594.
- Seuront, L., F. G. Schmitt, Y. Lagadeuc, D. Schertzer, and S. Lovejoy. 1999. Universal multifractal analysis as a tool to characterize multiscale intermittent patterns: example of phytoplankton distribution in turbulent coastal waters. J. Plankton. Res. **21(5)**.
- Seuront, L., V. Gentilhomme, and Y. Lagadeuc. 2002. Small-scale nutrient patches in tidally mixed coastal waters. Mar. Ecol. Prog. Ser. **232**: 29-44.
- Seuront, L., and D. Vincent. 2008. Increased seawater viscosity, Phaeocystis globosa spring bloom and Temora longicornis feeding and swimming behaviours. Mar. Ecol. Prog. Ser. **363**: 131-145.
- Sottolichio, A., P. Castaing, H. Etcheber, E. Maneux, M. Schmeltz, and S. Schmidt. 2011. Observations of suspended sediment dynamics in a highly turbid macrotidal

- estuary, derived from continuous monitoring. *J. Coastal. Res. SI.* **64**: 1579 – 1583.
- Spilmont, N., T. Méziane, L. Seuront, and D. T. Welsh, D. 2009. Identification of the food sources of sympatric ghost shrimp (*Trypaea australiensis*) and soldier crab (*Mictyris longicarpus*) populations using a lipid biomarker, dual stable isotope approach. *Austral. Ecol.* **34(8)**: 878-888.
- Tsirtsis, G., S. Spatharis, and M. Karydis. 2008. Application of the lognormal equation to assess phytoplankton community structural changes induced by marine eutrophication. *Hydrobiologia.* **605(1)**: 89-98.
- Turchin, P. 2003. Complex population dynamics: a theoretical/empirical synthesis (Vol. 35). Princeton University Press.
- Wang, Z., Y. Qi, J. Chen, N. Xu, and Y. Yang. 2006. Phytoplankton abundance, community structure and nutrients in cultural areas of Daya Bay, South China Sea. *J. Mar. Syst.* **62(1)**: 85-94.
- Widdicombe, C. E., D. Eloire, D. Harbour, R. P. Harris, and P. J. Somerfield. 2010. Long-term phytoplankton community dynamics in the Western English Channel. *J. Plankton Res.* **32(5)**: 643-655.
- Williamson, M., and K. J. Gaston. 2005. The lognormal distribution is not an appropriate null hypothesis for the species–abundance distribution. *J. Anim. Ecol.* **74(3)**: 409-422.
- Winder, M., and J. E. Cloern. 2010. The annual cycles of phytoplankton biomass. *Philos T Roy Soc B.* **365(1555)** : 3215-3226.
- Woerther, P. 1998. Marel, Mesures Automatisées en Réseau pour l'Environnement Littoral. L'Eau, l'Industrie, les Nuisances. **217**: 67-71.
- Zongo, S.B., F.G. Schmitt, and A. Lefebvre. 2011. Observations biogéochimiques des eaux côtières à Boulogne-sur-mer à haute fréquence: les mesures automatiques de la bouée MAREL, In: Observation des écosystèmes marins et

terrestres de la Côte d'opale : du naturalisme à l'écologie, edited by F.G. Schmitt, Presses de l'UOF, pp. 253-266.

Zongo, S. B., and F. G. Schmitt. 2011. Scaling properties of pH fluctuations in coastal waters. *Nonlin. Processes Geophys.* **18**: 829-839.

Tables

Parameter	Fluo- rescence	Temp- erature	P.A.R	Silicates	Nitrates	Phosphates
Available data	2004 to 2011	2004 to 2010	2004 to 2011	2004 to 2009	2004 to 2009	2004 to 2009
Number of present data	168948	138574	92204	3175	3029	2719
% of acquisition values	80	88	44	72	69	62
frequency	20 min	20 min	20 min	12h	12h	12h

Table 1. The MAREL Carnot parameters used in the present study, with their percentages of acquisition values and frequencies.

Figures

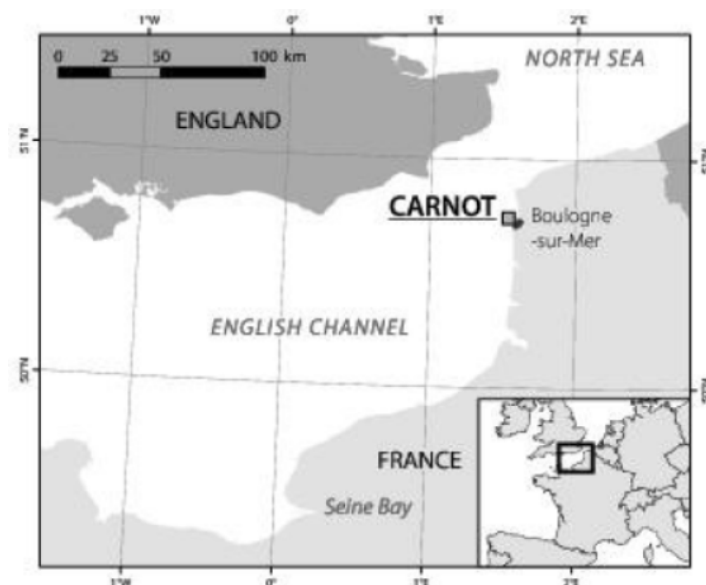


Figure 1. A map showing the measurement location in Boulogne-sur-mer's coastal waters (France) at position 50.7404 N, 1.5676 W, in the eastern English Channel.

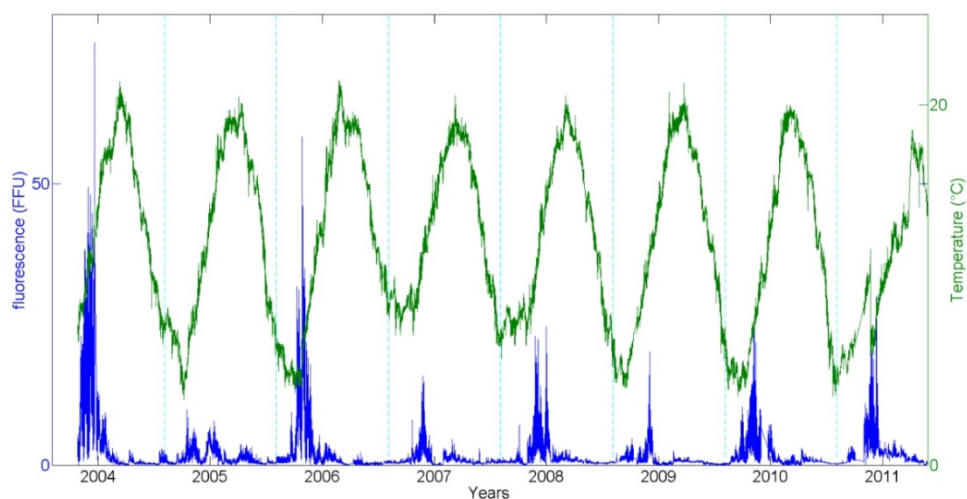


Figure 2. Raw data from MAREL Carnot between 2004 and 2011, the fluorescence (in FFU) and below the temperature (in °C). Vertical lines separate each year.

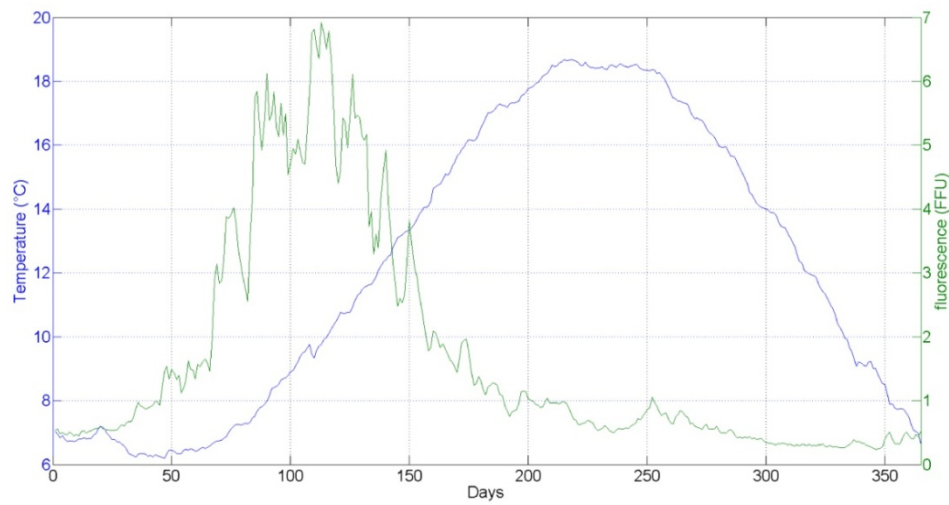


Figure 3. The climatology of both fluorescence and temperature: inter-annual daily averages computed using the data from 2004 to 2011.

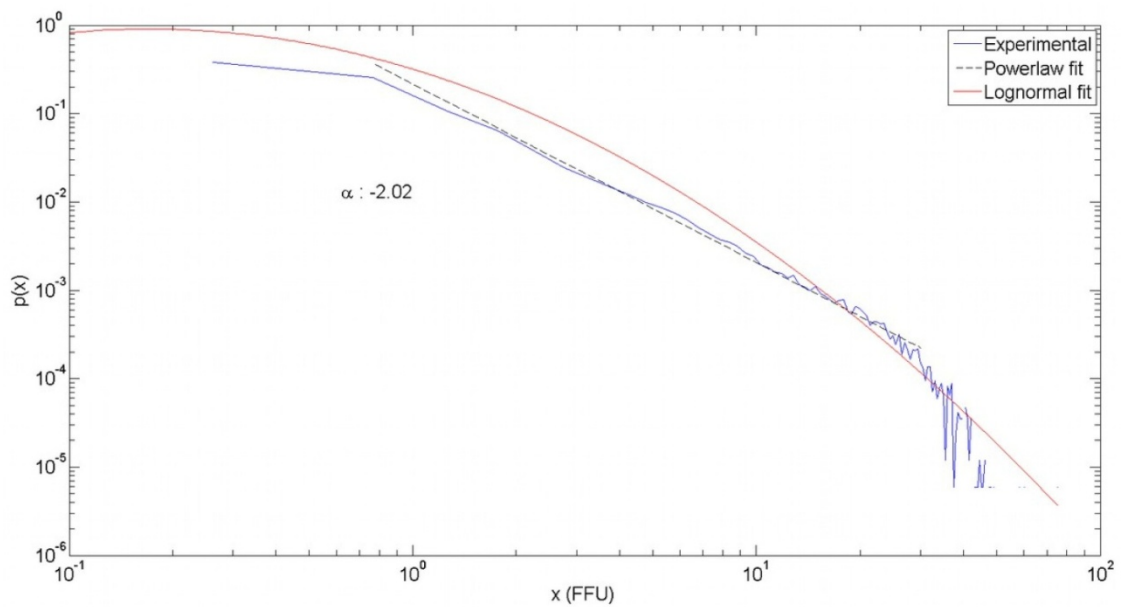


Figure 4. The probability density function in log-log scale of fluorescence data, power-law and lognormal fits are shown for comparison.

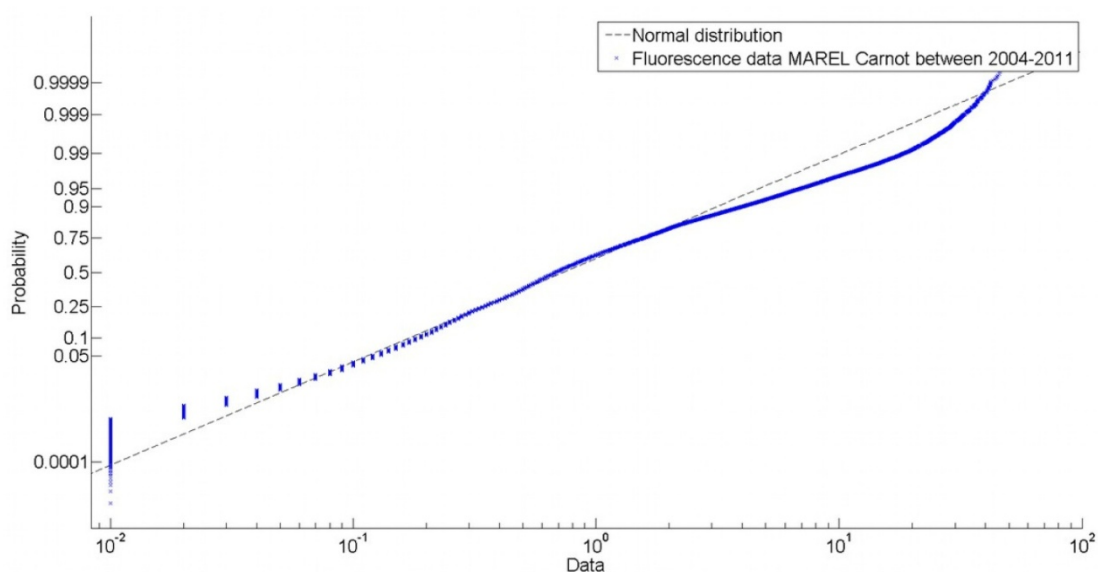


Figure 5. Lognormal test of the fluorescence distribution, using the so-called lognormal probability plot; the black line is a straight line corresponding to the lognormal distribution, and the dots are the fluorescence data.

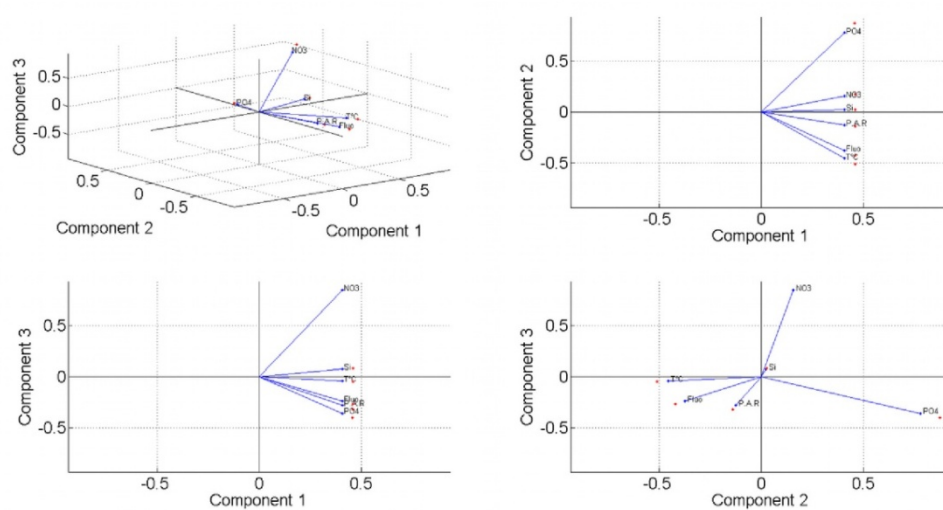


Figure 6. Principal component analysis represented in 3D and 2D for time series of nitrates, phosphates, silicates, P.A.R, temperature and fluorescence.

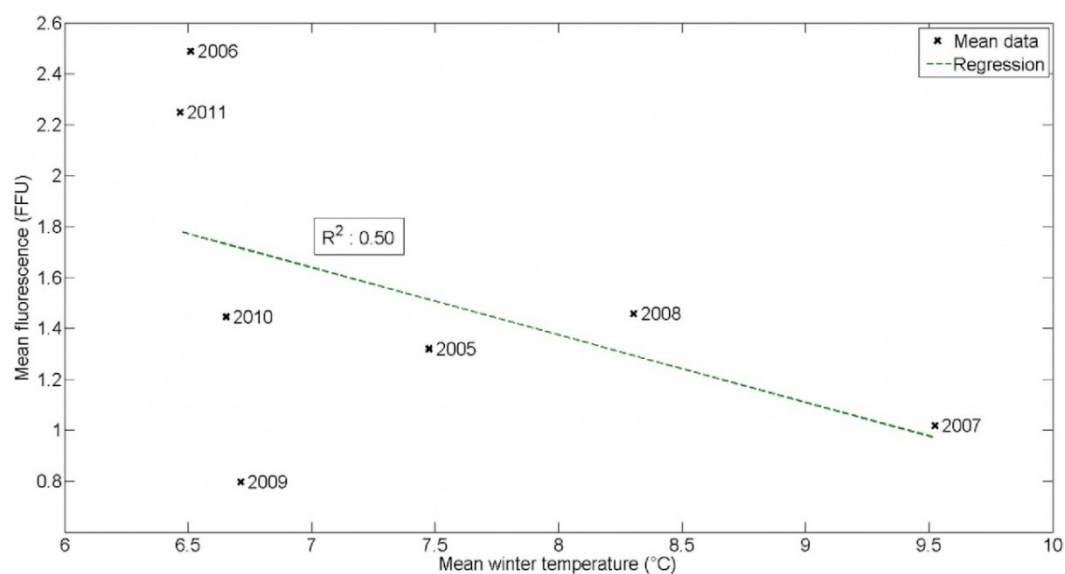


Figure 7. Annual fluorescence versus annual temperature. The global negative relationship is the opposite as the one suggested in Gomez and Souissi (2008).

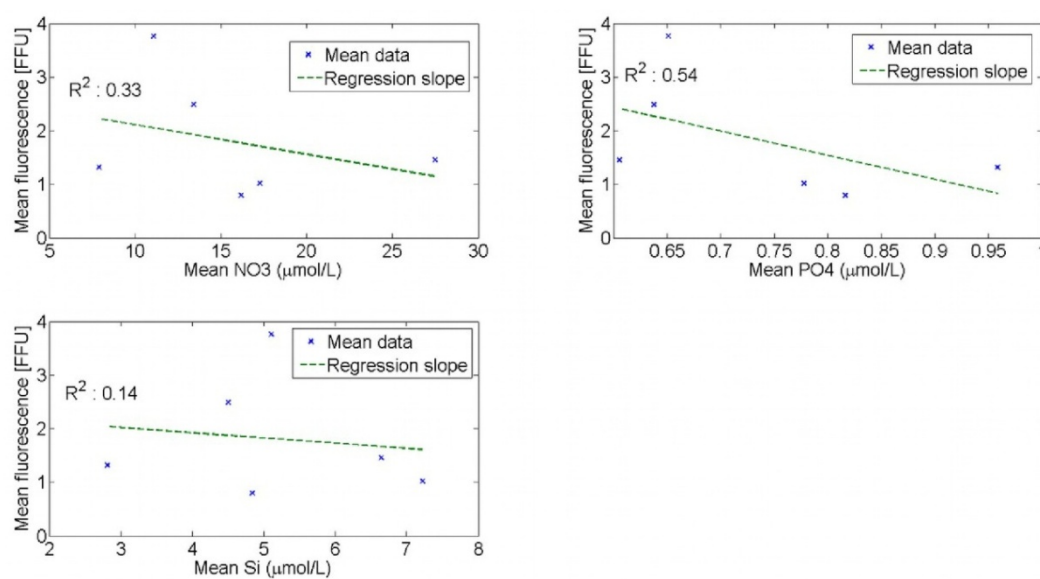


Figure 8. Annual fluorescence versus average nutrient. Abundance: (a) nitrate; (b) phosphates and (c) silicates.

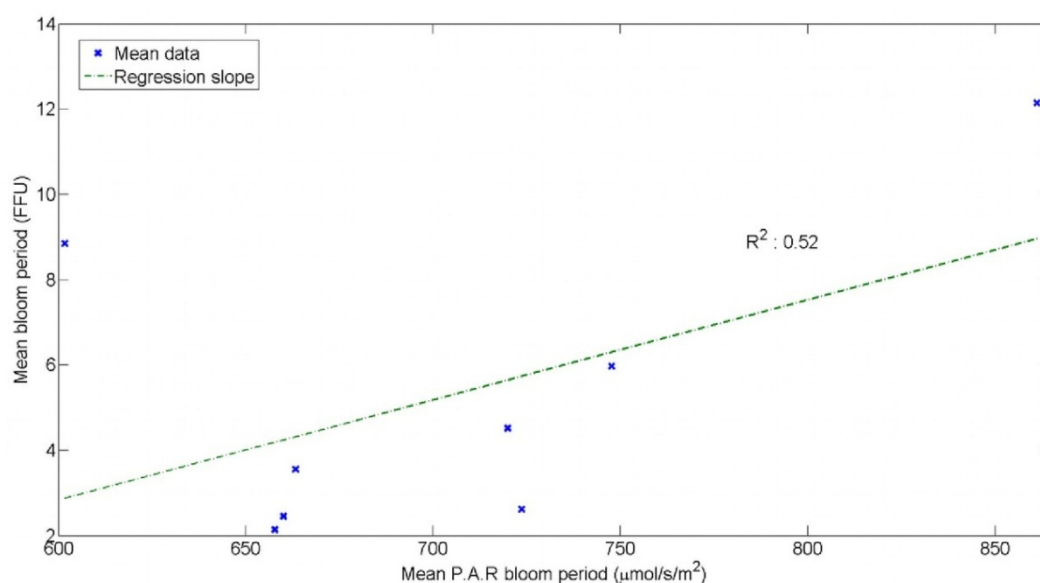


Figure 9. Annual fluorescence versus PAR.

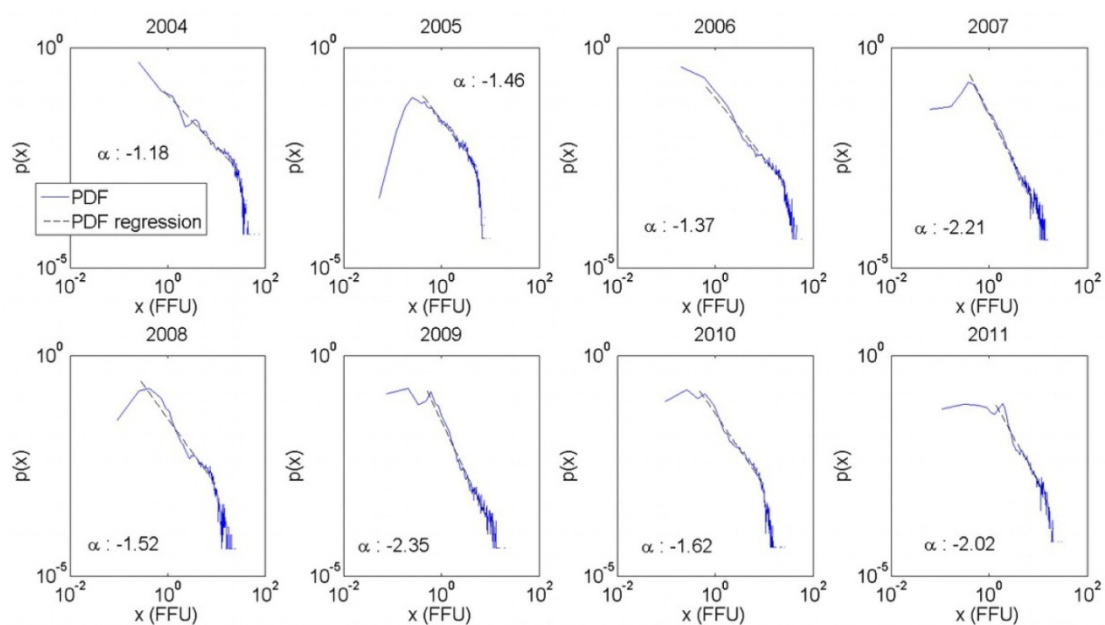


Figure 10. PDF of fluorescence data, in log-log scale for fluorescence, for each year.

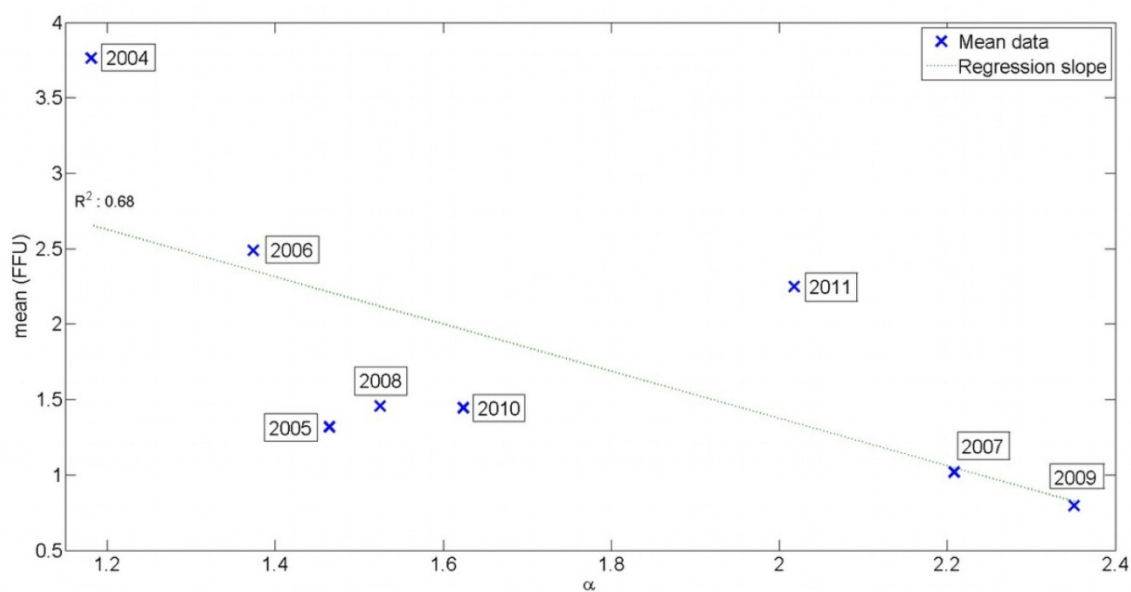


Figure 11. The mean annual florescence value versus the hyperbolic PDF slope value for the same period.

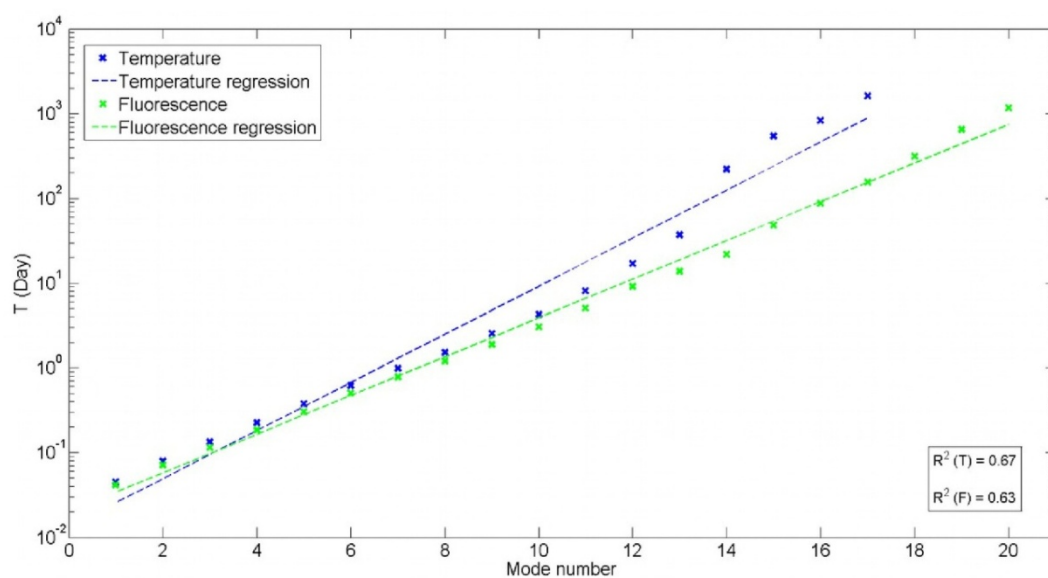


Figure 12. Evolution of the mean time scale of each mode, versus the mode number, for temperature and fluorescence data; an exponential relation is visible in both cases.

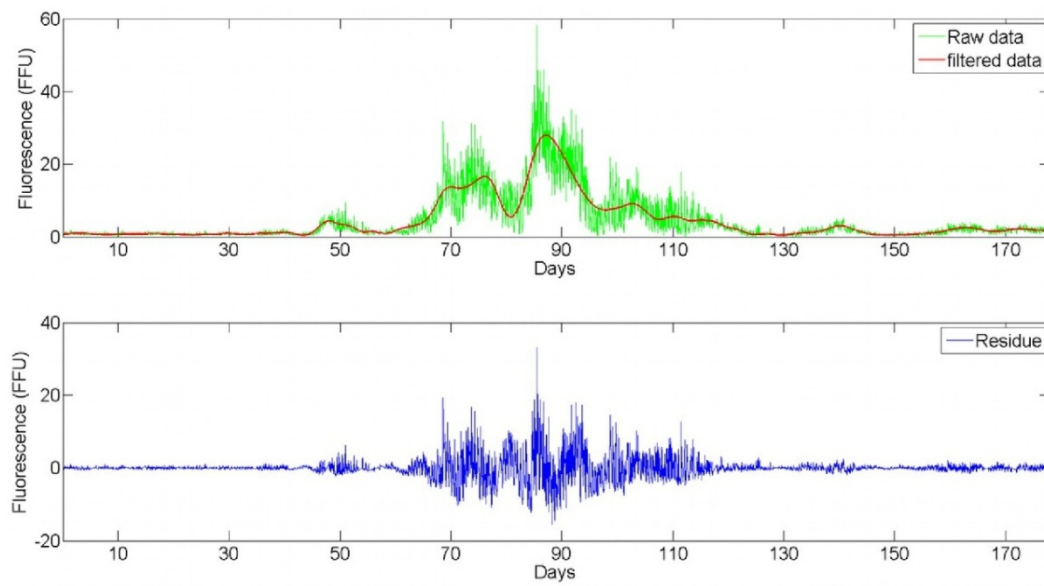


Figure 13. Raw fluorescence data for the year 2006, superposed to the trend estimated using the EMD method, modes 12 to 20, corresponding to a smoothing at scale 5 days.

Below: the high frequency part, corresponding to the sum of modes from 1 to 11.

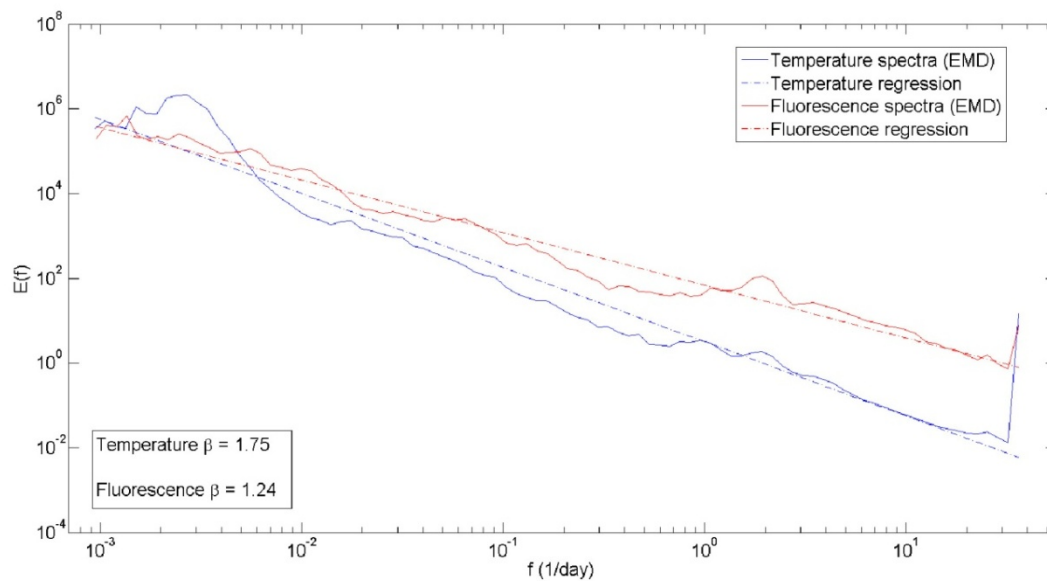


Figure 14. Power spectra in log-log plot, of temperature and fluorescence, estimated using the EMD-HSA method.

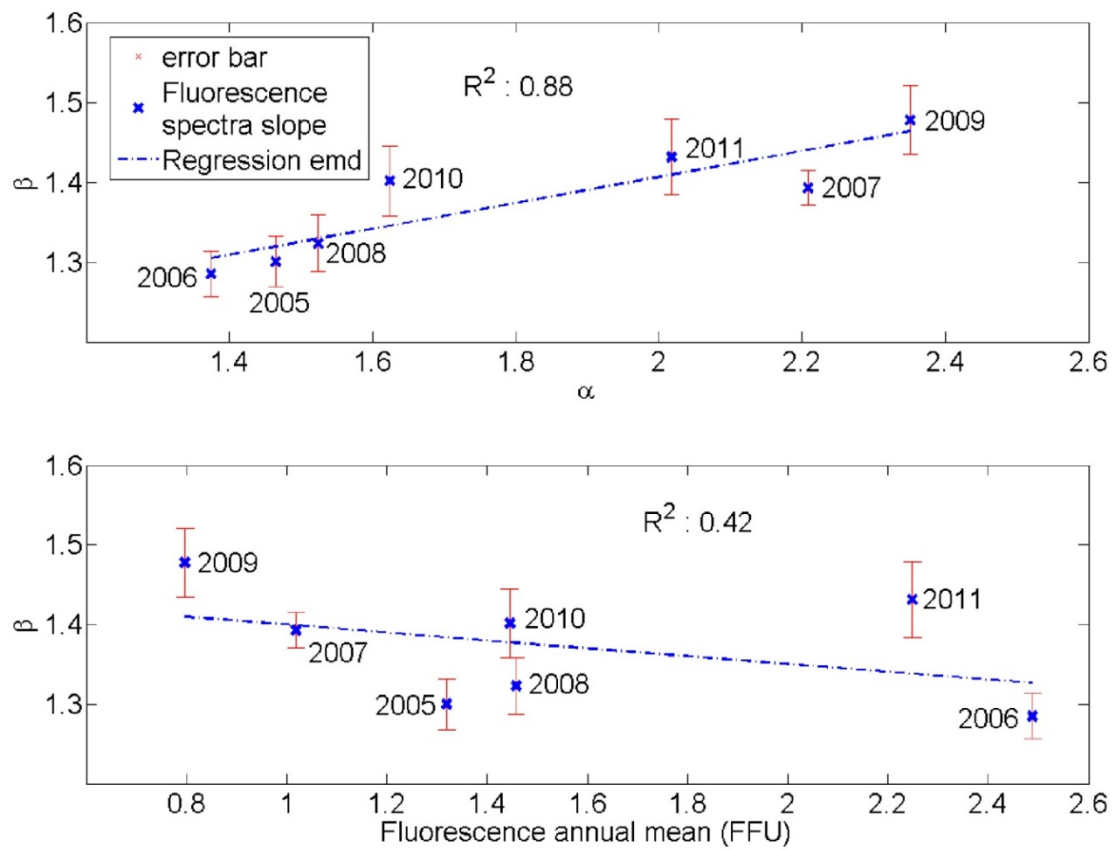


Figure 15. Spectral slopes of temperature versus: (a) hyperbolic PDF slopes of fluorescence for following year and (b) mean fluorescence abundance for the following year.

Annexe 3.

Ci-dessous reproduction d'un article paru dans un ouvrage avec ISBN, suite à un colloque national.

Derot, J., Schmitt F. G., V. Gentihomme, Dynamique non-linéaire des efflorescences du phytoplancton en milieu marin, in *Comptes-rendus de la 17e Rencontre du Non-linéaire*, ed. E. Falcon et al., Paris, Non-linéaire Publications, 2014, pp.23-28.

Dynamique non-linéaire des efflorescences du phytoplancton en milieu marin

J. Derot^{1,2}, F.G. Schmitt², & V. Gentilhomme³

¹ Université du Littoral Côte d'Opale, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR LOG 8187, 32 av. Foch, 62930 Wimereux

² CNRS, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR LOG 8187, 28 av. Foch, 62930 Wimereux

³ Université de Lille 1, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR LOG 8187, 28 av. Foch, 62930 Wimereux

jonathan.derot@univ-lille1.fr

Résumé. Fortement influencé par la température et demandant de la lumière pour sa croissance, le développement du phytoplancton (plancton végétal) a une forte composante saisonnière. L'objectif de notre étude est ici d'analyser la dynamique non-linéaire et multi-échelles du phytoplancton en milieu côtier. La base de données utilisée dans cette étude provient d'un système automatisé en point fixe, appelé MAREL Carnot, géré par IFREMER. Ce système, localisé à la sortie de la rade du port de Boulogne-sur-Mer, enregistre plus de 15 paramètres physico-chimiques avec une périodicité de 20 minutes. Nous utilisons ici les données enregistrées entre 2004 et 2011. Différents résultats sont obtenus concernant la dynamique et les statistiques des efflorescences. D'un côté, la fonction de densité de probabilités (pdf) réalisée sur l'ensemble des données de fluorescence obéit à une loi de puissance de pente -2. En considérant les pdf année par année, on met en évidence une relation de la pente hyperbolique avec les températures moyennes annuelles. En ce qui concerne la dynamique, nous utilisons la méthode EMD (Empirical Mode Decomposition) pour estimer des spectres de puissance, et étudier la dynamique multi-échelle via des lois d'échelle. On met en évidence des relations entre les pentes issues de ces spectres et la fluorescence. La méthode EMD est également utilisée pour mettre en évidence les fortes oscillations existant en période de bloom

Abstract. Phytoplankton (vegetal plankton) plays an important role in aquatic ecosystems, and also in the carbon dynamics. Strongly influenced by the temperature and requiring light for growth, its development has a strong seasonal component. In the Eastern English Channel, phytoplankton blooms take place every year in spring. The aim of our study is to analyze the nonlinear and multiscale dynamics of phytoplankton in these coastal waters. The database used in this study comes from fixed point automated system, called MAREL Carnot, managed by IFREMER. This system, located at the exit of the harbor of Boulogne-sur-Mer, records more than 15 physico-chemical parameters with an interval of 20 minutes. We use here recorded data between 2004 and 2011. Different results are obtained on the dynamics and statistics of blooms. On the one hand, the probability density function (pdf) estimated on all fluorescence data obeys a power law with a slope of -2. Viewing PDF year-by-year, it highlights a relationship between the hyperbolic slope and the average annual temperatures. As regards the dynamics, we use the EMD method (Empirical Mode Decomposition) to estimate power spectra, and study the multi-scale dynamics via scaling laws. We highlight a relationship between the slopes of these spectra and fluorescence. The EMD method is also used to show the strong oscillations occurring during blooms

1 Introduction

Le phytoplancton joue un rôle important dans l'écosystème aquatique, et aussi dans la dynamique du carbone. Fortement influencé par la température et demandant de la lumière pour sa croissance, son développement a une forte composante saisonnière. En Manche orientale, des efflorescences ("blooms") de phytoplancton ont lieu tous les ans au printemps. Les données de phytoplancton, comme d'autres données d'abondance en écologie [1,2], présentent de très fortes fluctuations multi-échelles, avec une dynamique non-linéaire très marquée. Le but principal de cette étude est d'avoir une meilleure compréhension de la dynamique de fluorescence et de l'impact que peuvent induire les températures sur cette dernière. L'utilisation de bases de données "hautes fréquences" enregistrées à point fixe permet ce type d'approche

2 Derot *et al*

[3,4,5,6,7]. Ci-dessous, nous présenterons la base de données, puis nous considérons la densité de probabilité des données, et enfin nous utiliserons la méthode EMD pour effectuer des analyses spectrales, étudier la dynamique à multi-échelles et les oscillations présentes dans le milieu.

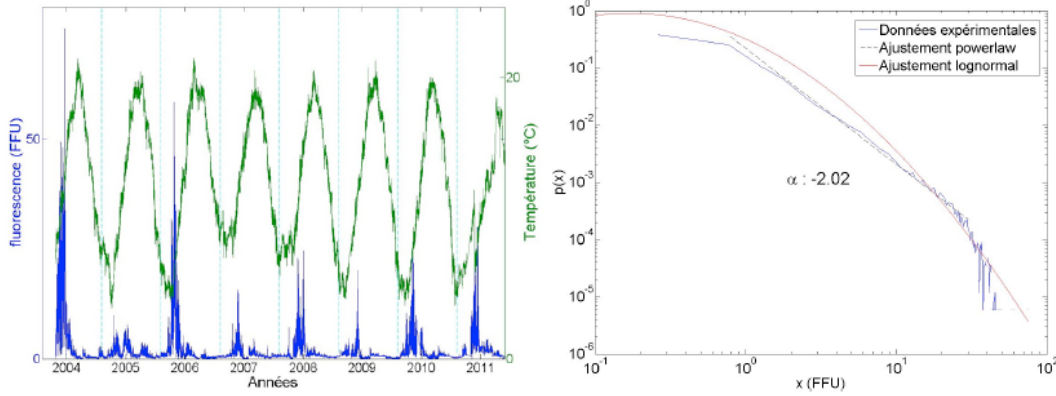


Figure1. (a) Données brutes provenant de MAREL Carnot entre 2004 et 2011 : les données de fluorescence en FFU et les données de températures. Les lignes pointillées séparent les années. (b) Représentation log-log de la PDF des données de fluorescence entre 2004 et 2011, avec un ajustement lognormal et un ajustement en loi de puissance avec une pente de 2.02.

2 Présentation des données et leur densité de probabilité

La balise MAREL Carnot est située à la sortie de la rade du port de Boulogne-sur-Mer en Manche orientale. Par son implantation, cette zone d'étude est donc assujettie à des forçages physiques très importants, car la Manche est soumise à un régime mégatidal [8]. Elle est aussi soumise à des forçages anthropiques, car Boulogne-sur-Mer est un important port de pêche. MAREL Carnot est capable d'enregistrer plus de 15 paramètres physico-chimiques avec une périodicité de 20 minutes et a été mise en service au début de l'année 2004. Quel que soit le marnage, les enregistrements sont toujours effectués à une profondeur de -1,5m, car les capteurs du dispositif sont installés sur un flotteur couissant dans un tube. Dans cette étude, nous nous intéresserons uniquement aux données de fluorescence et de température, dont on peut voir une représentation en figure 1a. Notons que certains problèmes inhérents au système automatisé en point fixe (défaillances techniques, périodes de maintenance, vandalisme, encrassement biologique,...) font que le pourcentage d'acquisition n'est pas de 100%. Pour la température et la fluorescence, les pourcentages d'acquisition sont respectivement de 80,36% et 87,88%. Pour plus de détails techniques, voir [9,10]. La PDF de l'ensemble des données de fluorescence est représentée en figure 1b en log-log, avec un ajustement en loi de puissance et un ajustement lognormal. L'ajustement en loi de puissance de la forme :

$$p(x) \approx x^{-\alpha} \quad (1)$$

avec $\alpha = 2$, est le plus proche des données. Le modèle lognormal est assez populaire en écologie pour l'abondance d'espèces depuis de nombreuses années, à tel point que la validité de ce modèle est souvent implicitement admise, lorsque les données d'abondance sont log-transformées avant de faire des tests statistiques reposant sur des statistiques gaussiennes. Le résultat ici montre que ce modèle n'est pas adapté pour le phytoplancton, et que cette hypothèse n'est donc pas correcte. Il serait intéressant de pouvoir comparer ces résultats avec d'autres bases de données pour en vérifier l'universalité.

Pour mettre en évidence les variations interannuelle de la PDF, nous avons estimé les PDF pour chaque année entre 2004 et 2011 (Figure 2). On constate qu'un ajustement en loi de puissance peut être

proposé à chaque fois, avec souvent pour les valeurs les plus extrêmes une décroissance plus rapide, de type exponentiel. A l'exception de l'année 2005 où cet ajustement n'est pas très bon, la loi de puissance est malgré tout valide sur une gamme de valeurs assez étendue. Cet exposant caractérise une structuration : plus la pente est faible, plus les fortes valeurs seront relativement présentes. La figure 3a représente l'abondance moyenne en fluorescence en fonction de la valeur de la pente de la PDF : on constate qu'une forte abondance est associée à une pente faible et une importante structuration du bloom. Inversement, une faible abondance est associée à une pente forte et une structuration du bloom moins importante. Nous n'avons pas constaté de relation visible entre l'abondance en sels nutritifs et cette pente ; par contre l'influence de la température hivernale sur le bloom printanier de l'année suivante est illustrée en figure 3b : on constate une relation entre cette température et l'amplitude du bloom : les hivers plus rigoureux ont tendance à être suivis le printemps suivant par un bloom plus marqué, comme proposé par [11,12].

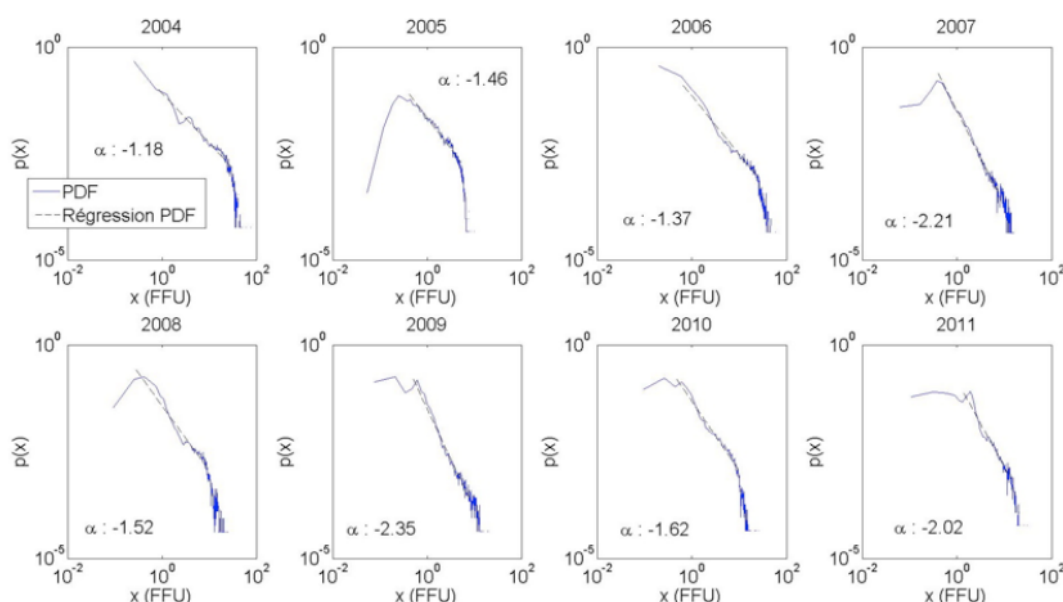


Figure 2. PDF année par année entre 2004 et 2011, pour les données de fluorescence. En pointillés, les ajustements en loi de puissance avec les coefficients associés.

3 Analyses spectrales et oscillations via la décomposition modale empirique

Dans cette section, nous nous intéressons à la dynamique de la série de fluorescence. La méthode intitulée décomposition modale empirique ou EMD (Empirical Mode Decomposition) est utilisée pour analyser les séries temporelles non stationnaires et non-linéaires. Cette méthode a été proposée en 1998 par Norden Huang [13] et permet de décomposer une série temporelle en une somme de séries temporelles appelée "modes", chacun ayant une fréquence caractéristique. La méthode a été appliquée aux données brutes de fluorescence et de température entre 2004 et 2011. La décomposition est faite de manière itérative, en considérant à chaque étape le signal comme étant la somme d'une composante basse fréquence et d'une composante haute fréquence. A la fin de la décomposition, la méthode exprime une

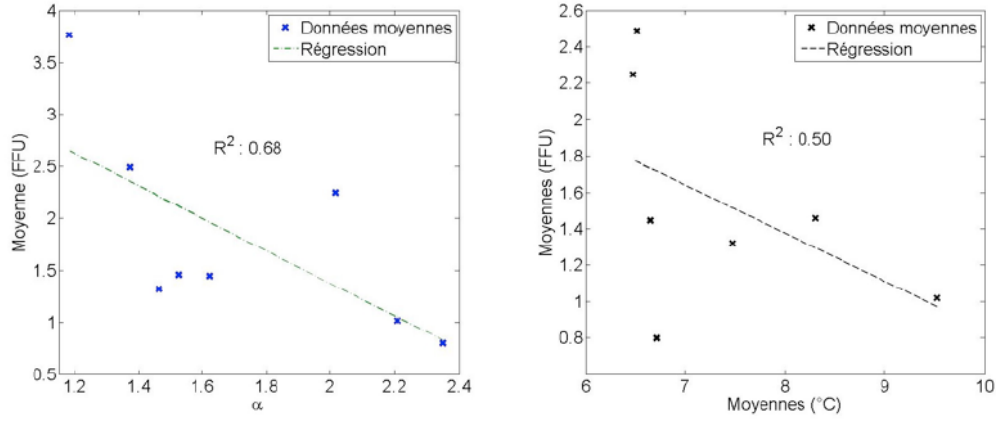
4 Derot *et al*

Figure3. Moyenne annuelle de la fluorescence en fonction de la pente de la loi de puissance ajustant la PDF (gauche), et en fonction de la température hivernale précédant le bloom printanier (droite).

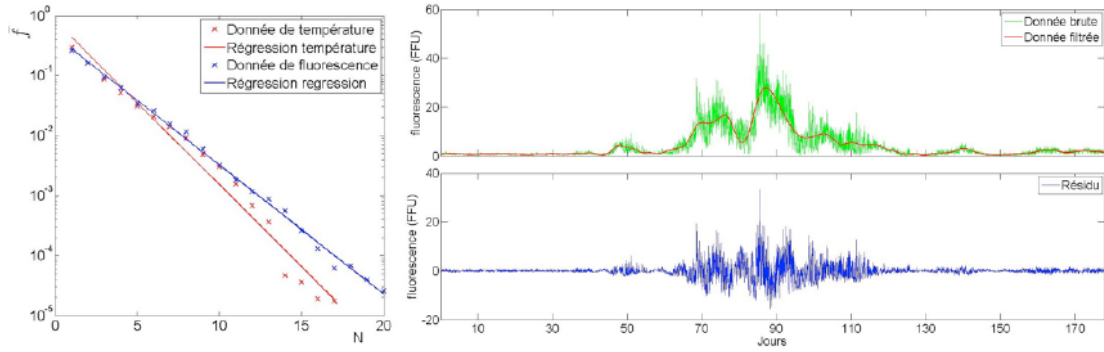


Figure4. (Gauche) La fréquence moyenne de chaque mode, en fonction du mode N , pour la série de température et de fluorescence. (Droite) Représentation du bloom de l'année 2006, avec un filtrage basse fréquence obtenu à partir de la méthode EMD, en ne conservant que les modes de 12 à 20 inclus (en haut), et en montrant la somme des modes de 1 à 11 pour la partie haute fréquence (en bas).

série temporelle $x(t)$ comme la somme d'un nombre fini de modes $C_i(t)$ et d'un résidu final $r_n(t)$ [13] :

$$x(t) = \sum_{i=1}^N C_i(t) + r_n(t) \quad (2)$$

Pour la fluorescence, la série est décomposée en 20 modes et le mode 21 représente le résidu. Si l'on somme tous les 20 modes plus le résidu, on retombe exactement sur la série de fluorescence brute entre 2004 et 2011. La fréquence moyenne de chaque mode est représentée en fonction du numéro du mode N en figure 4a. On constate une répartition quasi-dyadique : la fréquence moyenne décroît exponentiellement (donc l'échelle augmente) lorsque le numéro de mode croît. On choisit un filtrage au mode 12, correspondant à une échelle temporelle de 5.07 jours. La figure 5b illustre ce filtrage : le bloom de l'année 2006 est représenté, avec un filtrage basse fréquence obtenu en conservant les modes de 12 à 20 inclus, plus le résidu. La partie haute fréquence est représentée en dessous, obtenue en sommant les modes de 1 à 11 inclus. Cette méthode peut être utilisée d'un côté pour détecter le bloom et de l'autre, pour caractériser les

fortes fluctuations existant pendant le bloom, qui peuvent s'apparenter aux oscillations obtenues pendant un tremblement de terre : de fortes oscillations caractérisant un phénomène critique hors équilibre.

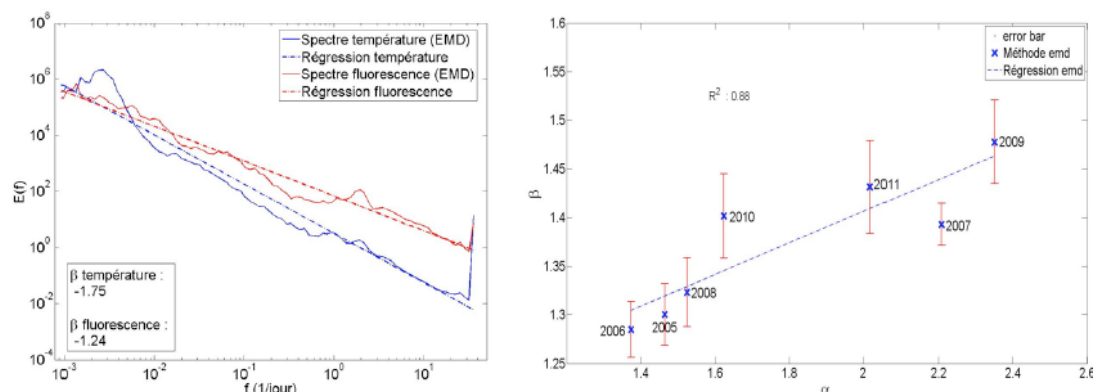


Figure 5. (Gauche) Pente spectrale des données de température et de fluorescence, estimées à partir de la méthode EMD. (Droite) Représentation de la pente spectrale de la fluorescence pendant les hivers pré-blooms, estimée par la méthode EMD, en fonction de la pente de la PDF hyperbolique des données de fluorescence au cours de l'année suivante.

Nous utilisons également la méthode EMD pour le calcul spectral [14,15,16], celle-ci fonctionnant même pour des séries temporelles avec un pas de temps non régulier (nous avons de nombreuses valeurs manquantes). Les analyses spectrales effectuées sur les deux séries sont représentées en figure 5a ; on constate des lois d'échelle, avec des exposants différents, proche de $5/3$ pour la température, et proche de 1.2 pour la fluorescence, montrant que l'activité biologique de la fluorescence se traduit par des lois d'échelle différentes d'un scalaire passif turbulent.

Nous considérons également la relation entre la pente spectrale des données de fluorescence pendant les hivers météorologiques, année par année. Ici, l'hiver météorologique ne correspond pas à l'hiver défini par le calendrier, mais il s'agit d'un hiver qui regroupe les 3 mois en moyenne les plus froids de l'année, c.-à-d. décembre, janvier et février. Le choix de cette définition de l'hiver est motivé par la volonté de voir l'impact des températures extrêmes dans la limite basse sur la dynamique de fluorescence. La figure 5b met en relation les pentes spectrales β des hivers pré-blooms avec les pentes issues des PDF de fluorescences pour chaque année. Pour plus de lisibilité, nous avons aussi référencé chaque année et implémenté des barres d'erreurs basées sur la déviation standard, entre les données spectrales et leurs droites de régression. On constate que plus les pentes spectrales augmentent, plus les pentes des PDF ont tendance à augmenter, et inversement. On pourrait ainsi supposer qu'il y a un lien entre la dynamique et les statistiques, entre les températures les plus froides de l'année et la dynamique du bloom du printemps suivant.

Si ces différents résultats se confirment, grâce aux futurs enregistrements de MAREL Carnot, nous pourrions potentiellement arriver à disposer d'un outil permettant de faire des prédictions sur la dynamique et la structuration du bloom à une échelle de trois mois.

Remerciements. Nous remercions IFREMER pour les données MAREL, en particulier Alain Lefebvre et Michel Répécaud. Le code EMD en Matlab utilisé ici a été écrit par Dr Gabriel Rilling et Pr. Patrick Flandrin du laboratoire de Physique, CNRS & ENS Lyon, et est disponible ici : <http://perso.ens-lyon.fr/patrick.flandrin/emd.html>. Il a été adapté par Yongxiang Huang de l'Université de Shanghai.

Références

1. A. BLARER AND M. DOEBELI Resonance effects and outbreaks in ecological time series. *Ecology Letters*, **2**, 167–177 (1999)
2. M. E. RITCHIE *Scale, heterogeneity, and the structure and diversity of ecological communities*, Princeton University Press (2009).
3. T. D. DICKEY The emergence of concurrent high resolution physical and bio-optical measurements in the upper ocean and their applications. *Review of Geophysics*, **29**, 383–413 (1991).
4. T. D. DICKEY AND R. H. DOUGLASS AND D. MANOV AND D. BOGUCKI AND P. C. WALTER AND P. PETRELIS An experiment in two way communication with a multivariable moored system in coastal waters. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **10**, 637–644 (1993).
5. F. P. CHAVEZ AND J. T. PENNINGTON AND R. HERLIEN AND H. JANNASCH AND G. THURMOND AND G. E. FRIEDERICH Moorings and drifters for real-time interdisciplinary oceanography. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **14**, 1199–1211 (1997).
6. G. C. CHANG, G. C AND T. D. DICKEY Optical and physical variability on timescales from minutes to the seasonal cycle on the New England shelf : July 1996 to June 1997. *Journal of Geophysical Research*, **106**, 9435–9453 (2001).
7. S. B. ZONGO AND F. G. SCHMITT Scaling properties of pH fluctuations in coastal waters. *Nonlinear Processes in Geophysics*, **18**, 829–839 (2011).
8. J. C. DAUVIN The main characteristics, problems and prospects for Western European coastal seas. *Marine Pollution Bulletin*, **57**, 22–40 (2008).
9. J. P. BERTHOME Marel : un réseau automatisé de veille pour l'environnement littoral. *Equinoxe*, 47–48, 34–35 (1994).
10. P. WOERTHER Marel, Mesures Automatisées en Réseau pour l'Environnement Littoral. *L'eau, l'Industrie, les Nuisances*, **217**, 67–71 (1998).
11. F. GOMEZ AND S. SOUSSI The impact of the 2003 summer heat wave and the 2005 late cold wave on the phytoplankton in the north-eastern English Channel. *Comptes Rendus Biologies*, **331**, 678–685 (2008).
12. D. DEVREKER AND S. SOUSSI AND J. C. MOLINERO AND D. BEYREND-DUR AND F. GOMEZ AND J. FORGET-LERAY Tidal and annual variability of the population structure of *Eurytemora affinis* in the middle part of the Seine Estuary during 2005. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **89**(4), 245–255 (2010).
13. N. E. HUANG AND Z. SHEN AND S.R. LONG AND M.C. WU AND H. H. SHIH AND Q. ZHENG AND H. H. LIU The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London Series A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **454**, 903–995 (1998).
14. N. E HUANG AND Z. SHEN AND S. R. LONG A new view of nonlinear water waves : The Hilbert Spectrum 1. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **31**, 417–457 (1999).
15. HUANG, Y., SCHMITT, F. G., LU, Z., & LIU, Y., An amplitude-frequency study of turbulent scaling intermittency using Hilbert spectral analysis. *EPL*, **84**, 40010 (2008).
16. SCHMITT FG, Y HUANG, Z. LU, Y. LIU, N. FERNANDEZ, Analysis of turbulent fluctuations and their intermittency properties in the surf zone using empirical mode decomposition, *Journal of Marine Systems*, **77**, 473–481 (2009).

Annexe 4.

Cette annexe référence les différentes publications et conférences où nous avons présenté les travaux en lien avec cette thèse.

International conferences

Derot, J., F.G. Schmitt, V. Gentilhomme : « Use of high frequency coastal water monitoring time series to understand the mechanisms of extremes in water quality », Asia Oceania Geosciences Society General Assembly, Singapore, 13-17 August 2012. *Poster*

Derot, J., F.G. Schmitt, V. Gentilhomme : « Using data of MAREL Carnot for understanding the mechanisms of extremes in the water quality at Boulognesur-Mer », Conference on Time- series analysis in marine science and applications for industry, Brest, 17-21 September 2012. *Poster*

Derot, J., F.G. Schmitt, V. Gentilhomme : « Phytoplankton dynamics and blooms: study of the spectral dynamics and extreme intensities using high frequency data », AGU fall meeting, San Francisco, 3-7 December 2012. *Poster*

Derot, J., F.G. Schmitt, V. Gentilhomme : « Use of high frequency coastal water monitoring time series to understand the mechanisms of extremes in water quality », Microscale interactions in aquatic environments, Ecole de physique des Houches, 10-15 March 2013. *Poster*

Derot, J., F.G. Schmitt, V. Gentilhomme : « Multiscale bloom dynamics from a high frequency autonomous measurement system in the eastern English Channel », European Geosciences Union General Assembly (EGU), Vienne (Austria), 27 april – 02 May 2014. *Poster*

National conferences and meetings

Derot, J., F.G. Schmitt, V. Gentilhomme : « Utilisation des données de MAREL Carnot pour la compréhension des mécanismes des extrêmes dans la qualité des eaux à Boulogne-sur-Mer », Journée des doctorants IREPSE, Lille (France), 16 March 2012. *Poster*

Derot, J., F.G. Schmitt, V. Gentilhomme : « Utilisation des données de MAREL Carnot pour la compréhension des mécanismes des extrêmes dans la qualité des eaux à Boulogne-sur-Mer », Doctoriales de la Mer (Campus de la mer), Boulogne-sur-Mer (France), 10 October 2013. *Oral*

Derot, J., F.G. Schmitt, V. Gentilhomme : « Dynamique non-linéaire des efflorescences du phytoplancton en milieu marin », La 17e Rencontre du non linéaire, Paris (Paris 7 Diderot, France), 18-20 March 2014. *Poster*

Derot, J., F.G. Schmitt, V. Gentilhomme : « Utilisation des données de MAREL Carnot pour la compréhension des mécanismes des extrêmes dans la qualité des eaux à Boulogne-sur-Mer », Instrumentation haute fréquence pour l'observation et la surveillance du l'environnement marin, Boulogne-sur-Mer (France), 12-13 June 2014. *Oral*

Derot, J., F.G. Schmitt, V. Gentilhomme : « Utilisation des données de MAREL Carnot pour la compréhension des mécanismes des extrêmes dans la qualité des eaux à Boulogne-sur-Mer », Journée des doctorants IREPSE, Lille (France), 19 June 2014. *Oral*

Articles published

Derot, J., Schmitt F. G., V. Gentilhomme, Dynamique non-linéaire des efflorescences du phytoplancton en milieu marin, in Comptes-rendus de la 17e Rencontre du Non-linéaire, ed. E. Falcon et al., Paris, Non-linéaire Publications, 2014, pp.23-28.

Articles submitted

Derot, J., Schmitt, F. G., Gentilhomme, V., & Zongo, S. B. High frequency phytoplankton bloom dynamics in coastal waters from an autonomous measurement system. Submitted in Journal of Marine Systems.

Derot, J., Schmitt, F. G., Gentilhomme, V., & Morin, P. Temperature dynamics comparison between Western and Eastern part of English Channel recorded by automated high-frequency systems. In preparation for "Comptes Rendus Géosciences".

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- AMINOT, A. & CHAUSSEPIED, M. 1983. *Manuel des analyses chimiques en milieu marin*, CNEXO.
- AMINOT, A., GUILLAUD, J.-F., ANDRIEUX-LOYER, F., KÉROUEL, R. & CANN, P. 1998. Apports de nutriments et développement phytoplanctonique en baie de Seine. *Oceanologica Acta*, 21, 923-935.
- AMINOT, A. & KÉROUEL, R. 2004. *Hydrologie des écosystèmes marins: paramètres et analyses*, Editions Quae.
- ANSELMET, F., GAGNE, Y., HOPFINGER, E. & ANTONIA, R. 1984. High-order velocity structure functions in turbulent shear flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 140, 63-89.
- BAI, F., ZHANG, J. & ZHENG, J. 2011. Similarity analysis of DNA sequences based on the EMD method. *Applied Mathematics Letters*, 24, 232-237.
- BELIN, C. 2001. Cahier des procédures REPHY. Document de prescription. *Rapport Interne, Ifremer/DEL*.
- BENDAT, J. S. & PIERSON, A. G. 2011. *Random data: analysis and measurement procedures*, John Wiley & Sons.
- BENSOUSSAN, N., ROMANO, J.-C., EL-HAIKALI, B. & LAFONT, M.-G. 2004. Importance du choix des échelles de temps pertinentes pour l'étude du fonctionnement d'écosystèmes marins littoraux. *Comptes Rendus Geoscience*, 336, 909-918.
- BERTHOME, J. 1994. MAREL: un réseau automatisé de veille pour l'environnement littoral. *Equinoxe*, 34-35.
- BLAIN, S., GUILLOU, J., TREGUER, P., WOERTHER, P., DELAUNEY, L., FOLLENFANT, E., GONTIER, O., HAMON, M., LEILDE, B. & MASSON, A. 2004. High frequency monitoring of the coastal marine environment using the MAREL buoy. *Journal of Environmental Monitoring*, 6, 569-575.
- BLARER, A. & DOEBELI, M. 1999. Resonance effects and outbreaks in ecological time series. *Ecology Letters (United Kingdom)*.

- BODE, A., CASTRO, C. G., DOVAL, M. D. & VARELA, M. 2002. New and regenerated production and ammonium regeneration in the western Bransfield Strait region (Antarctica) during phytoplankton bloom conditions in summer. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49, 787-804.
- BRADBURY, J. 2004. Nature's nanotechnologists: unveiling the secrets of diatoms. *PLoS biology*, 2, e306.
- BROWN, R. 1828. XXVII. A brief account of microscopical observations made in the months of June, July and August 1827, on the particles contained in the pollen of plants; and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies. *The Philosophical Magazine, or Annals of Chemistry, Mathematics, Astronomy, Natural History and General Science*, 4, 161-173.
- CARIOU, T., MACÉ, É. & MORIN, P. 2002. La série océanographique littorale Estacade de l'Observatoire Océanologique de Roscoff: Résultats des observations 1985–2002. *Rapport, Observatoire océanographique de Roscoff, France*.
- CHANG, G. & DICKEY, T. 2001. Optical and physical variability on timescales from minutes to the seasonal cycle on the New England shelf: July 1996 to June 1997. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 106, 9435-9453.
- CHAVEZ, F. P., PENNINGTON, J. T., HERLIEN, R., JANNASCH, H., THURMOND, G. & FRIEDERICH, G. E. 1997. Moorings and drifters for real-time interdisciplinary oceanography. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 14, 1199-1211.
- CHEN, X., WU, Z. & HUANG, N. E. 2010. The time-dependent intrinsic correlation based on the empirical mode decomposition. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2, 233-265.
- CHOPTUIK, M. W. 1993. Universality and scaling in gravitational collapse of a massless scalar field. *Physical Review Letters*, 70, 9.
- CLAUSET, A., SHALIZI, C. R. & NEWMAN, M. E. 2009. Power-law distributions in empirical data. *SIAM review*, 51, 661-703.
- CLOERN, J. E., GRENZ, C. & VIDERGAR-LUCAS, L. 1995. An empirical model of the phytoplankton chlorophyll: carbon ratio-the conservation factor between productivity and growth rate. *Limnology and Oceanography*, 40, 1313-1321.
- COHEN, L. 1995. *Time-frequency analysis*, Prentice Hall PTR Englewood Cliffs, NJ.

- CORRSIN, S. 1951. On the spectrum of isotropic temperature fluctuations in an isotropic turbulence. *Journal of Applied Physics*, 22, 469-473.
- CRONIN, M. & SPRINTALL, J. 2009. Wind-and buoyancy-forced upper ocean. *Marine Ecological Processes: A derivative of the Encyclopedia of Ocean Sciences*, 237.
- DANILO, C. 2009. *Évaluation des courants de surface océanique au moyen d'un radar à ouverture synthétique*. Thèse de doctrat, Université de Bretagne occidentale-Brest.
- DAUVIN, J.-C. 2008. The main characteristics, problems, and prospects for Western European coastal seas. *Marine Pollution Bulletin*, 57, 22-40.
- DAUVIN, J.-C., JONCOURT, M., LATROUITE, D. & RAGUÉNÈS, G. 1989. Température et salinité de l'eau de mer au large de Roscoff de 1983 à 1987. *Cahiers de Biologie Marine*, 30, 5-10.
- DENG, Y., WANG, W., QIAN, C., WANG, Z. & DAI, D. 2001. Boundary-processing-technique in EMD method and Hilbert transform. *Chinese Science Bulletin*, 46, 954-960.
- DEROT, J., SCHMITT, F. & GENTILHOMME, V. 2014. Dynamique non-linéaire des efflorescences du phytoplancton en milieu marin. In: E. Falcon, C. Josseland, M. Lefranc, F. Pétrélis & C.-T. Pham (Eds), *Comptes-Rendus du Non-linéaire Paris 2014*, 38.
- DEVREKER, D., SOUISSI, S., MOLINERO, J. C., BEYREND-DUR, D., GOMEZ, F. & FORGET-LERAY, J. 2010. Tidal and annual variability of the population structure of *Eurytemora affinis* in the middle part of the Seine Estuary during 2005. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 89, 245-255.
- DICKEY, T. D. 1991. The emergence of concurrent high-resolution physical and bio-optical measurements in the upper ocean and their applications. *Reviews of Geophysics*, 29, 383-413.
- DICKEY, T. D., DOUGLASS, R., MANOV, D., BOGUCKI, D., WALKER, P. & PETRELIS, P. 1993. An experiment in two-way communication with a multivariable moored system in coastal waters. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 10, 637-644.

- DUR, G., SCHMITT, F. & SOUISSI, S. 2007. Analysis of high frequency temperature time series in the Seine estuary from the Marel autonomous monitoring buoy. *Hydrobiologia*, 588, 59-68.
- EPPLEY, R., HARRISON, W., CHISHOLM, S. W. & STEWART, E. 1977. Particulate organic matter in surface waters off southern California and its relationship to phytoplankton [Algae]. *Journal of Marine Research*.
- ETCHEBER, H., SCHMIDT, S., SOTTOLICHIO, A., MANEUX, E., CHABAUX, G., ESCALIER, J.-M., WENNEKES, H., DERRIENNIC, H., SCHMELTZ, M. & QUEMENER, L. 2011. Monitoring water quality in estuarine environments: lessons from the MAGEST monitoring program in the Gironde fluvial-estuarine system. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 831-840.
- EVANS, M., HASTINGS, N. & PEACOCK, B. 2001. Statistical distributions. *Measurement Science and Technology*, 12, 117.
- FENOGLIO-MARC, L. 2001. Analysis and representation of regional sea-level variability from altimetry and atmospheric-oceanic data. *Geophysical Journal International*, 145, 1-18.
- FEUCHTMAYR, H., THACKERAY, S. J., JONES, I. D., DE VILLE, M., FLETCHER, J., JAMES, B. & KELLY, J. 2012. Spring phytoplankton phenology—are patterns and drivers of change consistent among lakes in the same climatological region? *Freshwater Biology*, 57, 331-344.
- FEYNMAN, R. P., LEIGHTON, R. B., SANDS, M. & HAFNER, E. 1965. The Feynman Lectures on Physics; Vol. I. *American Journal of Physics*, 33, 750-752.
- FLANDRIN, P., RILLING, G. & GONCALVES, P. 2004. Empirical mode decomposition as a filter bank. *Signal Processing Letters, IEEE*, 11, 112-114.
- FRIEDER, C., NAM, S., MARTZ, T. & LEVIN, L. 2012. High temporal and spatial variability of dissolved oxygen and pH in a nearshore California kelp forest. *Biogeosciences*, 9, 3917-3930.
- FRISCH, U. 1995. *Turbulence: the legacy of AN Kolmogorov*, Cambridge University Press.
- GABAIX, X., GOPIKRISHNAN, P., PLEROU, V. & STANLEY, H. E. 2003. A theory of power-law distributions in financial market fluctuations. *Nature*, 423, 267-270.

- GENTILHOMME, V. & LIZON, F. 1997. Seasonal cycle of nitrogen and phytoplankton biomass in a well-mixed coastal system (Eastern English Channel). *Hydrobiologia*, 361, 191-199.
- GILPIN, L., DAVIDSON, K. & ROBERTS, E. 2004. The influence of changes in nitrogen: silicon ratios on diatom growth dynamics. *Journal of Sea Research*, 51, 21-35.
- GÓMEZ, F. & SOUISSI, S. 2008. The impact of the 2003 summer heat wave and the 2005 late cold wave on the phytoplankton in the north-eastern English Channel. *Comptes Rendus Biologie*, 331, 678-685.
- GRANT, H., STEWART, R. & MOILLIET, A. 1962. Turbulence spectra from a tidal channel. *Journal of Fluid Mechanics*, 12, 241-268.
- GRATTEPANCHE, J.-D., BRETON, E., BRYLINSKI, J.-M., LECUYER, E. & CHRISTAKI, U. 2010. Succession of primary producers and micrograzers in a coastal ecosystem dominated by *Phaeocystis globosa* blooms. *Journal of Plankton Research*.
- GRAY, J. S. 1997. Marine biodiversity: patterns, threats and conservation needs. *Biodiversity & Conservation*, 6, 153-175.
- GUILYARDI, É. 2001. Quand le sel de l'océan pimente le climat. *La météo* 33, 34-44.
- GUTENBERG, B. & RICHTER, C. F. 1956. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration (second paper). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 46, 105-145.
- GYPENS, N., LACROIX, G. & LANCELOT, C. 2007. Causes of variability in diatom and *Phaeocystis* blooms in Belgian coastal waters between 1989 and 2003: A model study. *Journal of Sea Research*, 57, 19-35.
- HAAPALA, J. 1994. Upwelling and its influence on nutrient concentration in the coastal area of the Hanko Peninsula, entrance of the Gulf of Finland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 38, 507-521.
- HANSON, A. & DONAGHAY, P. L. 1998. Micro-to fine-scale chemical gradients and layers in stratified coastal waters. *Oceanography-Washington DC-Oceanography Society*, 11, 10-17.

- HARLEY, C. D., RANDALL HUGHES, A., HULTGREN, K. M., MINER, B. G., SORTE, C. J., THORNER, C. S., RODRIGUEZ, L. F., TOMANEK, L. & WILLIAMS, S. L. 2006. The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology letters*, 9, 228-241.
- HEISLER, J., GLIBERT, P. M., BURKHOLDER, J. M., ANDERSON, D. M., COCHLAN, W., DENNISON, W. C., DORTCH, Q., GOBLER, C. J., HEIL, C. A. & HUMPHRIES, E. 2008. Eutrophication and harmful algal blooms: a scientific consensus. *Harmful algae*, 8, 3-13.
- HESSE, K., TILLMANN, U. & BROCKMANN, U. 1995. Nutrient-phytoplankton relations in the German Wadden Sea. *ICES CM 1995, T: 8*.
- HOULIEZ, E., LIZON, F., ARTIGAS, L. F., LEFEBVRE, S. & SCHMITT, F. G. 2013. Spatio-temporal variability of phytoplankton photosynthetic activity in a macrotidal ecosystem (the Strait of Dover, eastern English Channel). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 129, 37-48.
- HUANG, N. E., SHEN, Z. & LONG, S. R. 1999. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert Spectrum 1. *Annual review of fluid mechanics*, 31, 417-457.
- HUANG, N. E., SHEN, Z., LONG, S. R., WU, M. C., SHIH, H. H., ZHENG, Q., YEN, N.-C., TUNG, C. C. & LIU, H. H. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454, 903-995.
- HUANG, Y. 2009. *Arbitrary order Hilbert spectral analysis definition and application to fully developed turbulence and environmental time series*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I.
- HUANG, Y. & SCHMITT, F. G. 2014. Time dependent intrinsic correlation analysis of temperature and dissolved oxygen time series using empirical mode decomposition. *Journal of Marine Systems*, 130, 90-100.
- HUANG, Y., SCHMITT, F. G., LU, Z. & LIU, Y. 2008. An amplitude-frequency study of turbulent scaling intermittency using Empirical Mode Decomposition and Hilbert Spectral Analysis. *EPL (Europhysics Letters)*, 84, 40010.

- HUANG, Y., SCHMITT, F. G., LU, Z. & LIU, Y. 2009. Analysis of daily river flow fluctuations using empirical mode decomposition and arbitrary order Hilbert spectral analysis. *Journal of Hydrology*, 373, 103-111.
- IERVOLINO, I., CHIOCCARELLI, E. & CONVERTITO, V. 2011. Engineering design earthquakes from multimodal hazard disaggregation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 1212-1231.
- JEFFREY, S. & MANTOURA, R. 1997. Development of pigment methods for oceanography: SCOR-supported working groups and objectives, In : S. JEFFREY, R. MANTOURA & S.W. Wright (Eds), *Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods*, UNESCO, Paris, France, 19-36.
- KANTZ, H. & SCHREIBER, T. 2004. *Nonlinear time series analysis*, Cambridge University Press.
- KHARIN, V. V., ZWIERS, F., ZHANG, X. & WEHNER, M. 2013. Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Climatic Change*, 119, 345-357.
- KLEIN, R. & MEAKIN, P. 1989. Universality in colloid aggregation. *Nature*, 339.
- KOLMOGOROV, A. N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1941. 299-303.
- KORENBERG, M., BRENNAN, C. H. & HUNTER, I. 1997. Raman spectral estimation via fast orthogonal search. *Analyst*, 122, 879-882.
- KORENBERG, M. J. 1989. A robust orthogonal algorithm for system identification and time-series analysis. *Biological Cybernetics*, 60, 267-276.
- LAMPARD, D. 1954. Generalization of the Wiener-Khintchine Theorem to Nonstationary Processes. *Journal of Applied Physics*, 25, 802-803.
- LANCELOT, C. 1995. The mucilage phenomenon in the continental coastal waters of the North Sea. *Science of the total environment*, 165, 83-102.
- LANCELOT, C. & MATHOT, S. 1987. Dynamics of a Phaeocystis-dominated spring bloom in Belgian coastal waters. I. Phytoplanktonic activities and related parameters. *Marine Ecology Progress Series*, 37, 239-248.

- LANOUX, A., ETCHEBER, H., SCHMIDT, S., SOTTOLICHIO, A., CHABAUD, G., RICHARD, M. & ABRIL, G. 2013. Factors contributing to hypoxia in a highly turbid, macrotidal estuary (the Gironde, France). *Environmental Science: Processes & Impacts*, 15, 585-595.
- LEFEBVRE, A. 2006. MAREL Carnot – Partie 1 : Bilan de la mise en place d'un système de mesures automatisées à haute fréquence en zone côtière de Boulogne-sur-Mer. . *Rapport Ifremer*, 18.
- LEFEBVRE, A. 2008. MAREL Carnot: Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous l'influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). *Rapport 3, bilan de l'année 2006.*, Ifremer/RST.LER.BL/08.04, 23 pp.
- LEFEBVRE, A. & BONTE, Y. 2006. Suivi régional des nutriments sur le littoral Nord-Pas De Calais-Bilan de l'année 2005.
- LEFEBVRE, A., GUISELIN, N., BARBET, F. & ARTIGAS, F. L. 2011. Long-term hydrological and phytoplankton monitoring (1992–2007) of three potentially eutrophic systems in the eastern English Channel and the Southern Bight of the North Sea. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, 68, 2029-2043.
- LEFEBVRE, A. & LAGACHE, C. 2008. Suivi régional des nutriments sur le littoral Nord-Pas de Calais/Picardie. *Bilan de l'année*.
- LEFEBVRE, A. & MÉGRET, C. 2014. Suivi Régional des Nutriments sur le littoral du Nord Pas de Calais Picardie. *Bilan de l'année 2013*, Ifremer/RST.LER.BL/14.05, Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 195 p.
- LEFEBVRE, A., VANHOUTTE-BRUNIER, A., MÉNESGUEN, A., CUGIER, P., LANCELOT, C., GYPENS, N., LACROIX, G., BILLEN, G., GARNIER, J. & BARBET, F. 2008. Modélisation intégrée des transferts de nutriments depuis les bassins versants de la Seine, la Somme et l'Escaut jusqu'en Manche—Mer du Nord. *Rapport Final projet Liteau II*, 4, 121510.
- LEGENDRE, P. & LEGENDRE, L. F. 2012. *Numerical ecology*, Elsevier.
- LEWIS, E. & PERKIN, R. 1981. The practical salinity scale 1978: Conversion of existing data. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 28, 307-328.

- LIDE, D. R. 2004. *CRC handbook of chemistry and physics*, CRC press.
- LOMB, N. R. 1976. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and space science*, 39, 447-462.
- LONG, S. R., HUANG, N., TUNG, C., WU, M., LIN, R., MOLLO-CHRISTENSEN, E. & YUAN, Y. 1995. The Hilbert techniques: an alternate approach for non-steady time series analysis. *IEEE Geoscience Remote Sensing Soc. Lett*, 3, 6-11.
- LOVATO, T., CIAVATTA, S., BRIGOLIN, D., RUBINO, A. & PASTRES, R. 2013. Modelling dissolved oxygen and benthic algae dynamics in a coastal ecosystem by exploiting real-time monitoring data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 119, 17-30.
- LOVE, J. J. & RIGLER, E. J. 2014. The magnetic tides of Honolulu. *Geophysical Journal International*.
- LUBAC, B., LOISEL, H., GUISELIN, N., ASTORECA, R., FELIPE ARTIGAS, L. & MÉRIAUX, X. 2008. Hyperspectral and multispectral ocean color inversions to detect *Phaeocystis globosa* blooms in coastal waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 113.
- LUMLEY, J. L. 1970. Stochastic Tools in Turbulence. Volume 12. Applied Mathematics and Mechanics. DTIC Document.
- LUMLEY, J. L. 2007. *Stochastic tools in turbulence*, Courier Dover Publications.
- MANEUX, E., CASTAING, P., CHABAUX, G., ESCALIER, J.-M., ETCHEBER, H., SCHMELTZ, M., SCHMIDT, S. & WOERTHER, P. 2010. MAGEST: Surveillance en continu pour la connaissance de la qualité des eaux de l'estuaire de la Gironde. *Actes Journées Nationales Génie Côtier–Génie Civil Edition*, 11, 521-528.
- MARENDET, F. & LAMPS, G. 1989. Port of Boulogne-sur-Mer. Marguet Dam. Flood discharge gates[Port de Boulogne-sur-Mer. Barrage Marguet. Porte d'évacuation des crues]. *Travaux*, 57-61.
- MARTIN-JÉZÉQUEL, V., HILDEBRAND, M. & BRZEZINSKI, M. A. 2000. Silicon metabolism in diatoms: implications for growth. *Journal of Phycology*, 36, 821-840.
- MÉNESGUEN, A. 2003. Les "marées vertes" en Bretagne, la responsabilité du nitrate. *Rapport/ ouvrage*, <http://www.lfremer.fr/docelec/doc/2000/rapport-143.pdf>.

- MENESGUEN, A., AMINOT, A., BELIN, C., CHAPELLE, A., GUILLAUD, J.-F., JOANNY, M., LEFEBVRE, A., MERCERON, M., PIRIOU, J.-Y. & SOUCHU, P. 2001. L'eutrophisation des eaux marines et saumâtres en Europe, en particulier en France. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/22/>.
- MOLER, C. Design of an interactive matrix calculator. Proceedings of the May 19-22, 1980, national computer conference, 1980a. ACM, 363-368.
- MOLER, C. 1980b. Matlab user's guide. *Alberquerque, USA*.
- MONCHY, S., GRATTEPANCHE, J.-D., BRETON, E., MELONI, D., SANCIU, G., CHABÉ, M., DELHAES, L., VISCOGLIOSI, E., SIME-NGANDO, T. & CHRISTAKI, U. 2012. Microplanktonic community structure in a coastal system relative to a *Phaeocystis* bloom inferred from morphological and tag pyrosequencing methods. *PloS ONE*, 7, e39924.
- NAM, S., KIM, G., KIM, K.-R., KIM, K., CHENG, L. O., KIM, K.-W., OSSI, H. & KIM, Y.-G. 2005. Application of real-time monitoring buoy systems for physical and biogeochemical parameters in the coastal ocean around the Korean peninsula. *Marine Technology Society Journal*, 39, 70-80.
- NEAL, C., HILTON, J., WADE, A. J., NEAL, M. & WICKHAM, H. 2006. Chlorophyll a in the rivers of eastern England. *Science of the Total Environment*, 365, 84-104.
- NEWTON, A. & MUDGE, S. M. 2003. Temperature and salinity regimes in a shallow, mesotidal lagoon, the Ria Formosa, Portugal. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57, 73-85.
- NØST, O. A. & ISACHSEN, P. E. 2003. The large-scale time-mean ocean circulation in the Nordic Seas and Arctic Ocean estimated from simplified dynamics. *Journal of Marine Research*, 61, 175-210.
- NUMMELIN, M. 1998. Log-normal distribution of species abundances is not a universal indicator of rain forest disturbance. *Journal of Applied Ecology*, 35, 454-457.
- OBUKHOV, A. Spectral energy distribution in a turbulent flow. Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1941. 22-24.
- PAERL, H. W. 2006. Assessing and managing nutrient-enhanced eutrophication in estuarine and coastal waters: Interactive effects of human and climatic perturbations. *Ecological Engineering*, 26, 40-54.

- PALL, P., AINA, T., STONE, D. A., STOTT, P. A., NOZAWA, T., HILBERTS, A. G., LOHMANN, D. & ALLEN, M. R. 2011. Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature*, 470, 382-385.
- PEPERZAK, L. 2003. Climate change and harmful algal blooms in the North Sea. *Acta Oecologica*, 24, S139-S144.
- PETERSON, B. J. 1979. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. *Nature*, 282, 677-680.
- PLATT, T. & DENMAN, K. L. 1975. Spectral analysis in ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 189-210.
- POLIS, G. A. & HURD, S. D. 1996. Linking marine and terrestrial food webs: allochthonous input from the ocean supports high secondary productivity on small islands and coastal land communities. *American naturalist*, 396-423.
- POPE, S. B. 2000. *Turbulent flows*, Cambridge university press.
- PRESS, W. H. & RYBICKI, G. B. 1989. Fast algorithm for spectral analysis of unevenly sampled data. *The Astrophysical Journal*, 338, 277-280.
- PRESTON-THOMAS, H. 1990. The International Temperature Scale of 1990(ITS-90). *Metrologia*, 27, 3-10.
- PREUMONT, A. 1990. *Vibrations aléatoires et analyse spectrale*, PPUR presses polytechniques.
- QUÉGUINER, B. 2011. Biogéochimie Côtière. *Centre d'Océanologie de Marseille, Aix-Marseille Université; CNRS; LOBUMR 6535, Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie, OSU/Centre d'Océanologie de Marseille*, 49, Unpublished.
- RAVEN, P. H., EVERT, R. F. & EICHHORN, S. E. 2005. *Biology of plants*, Macmillan.
- RICHARDSON, L. F. 1922. *Weather prediction by numerical process*, Cambridge University Press.
- RICHLIN, M. L., MORTON, S. L., JAMALI, E. A., RAJAN, A. & ANDERSON, D. M. 2010. The catastrophic 2008–2009 red tide in the Arabian gulf region, with observations

- on the identification and phylogeny of the fish-killing dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*. *Harmful algae*, 9, 163-172.
- RIEGMAN, R., NOORDELOOS, A. A. & CADÉE, G. C. 1992. Phaeocystis blooms and eutrophication of the continental coastal zones of the North Sea. *Marine Biology*, 112, 479-484.
- RILLING, G., FLANDRIN, P. & GONCALVES, P. On empirical mode decomposition and its algorithms. IEEE-EURASIP workshop on nonlinear signal and image processing, 2003. NSIP-03, Grado (I), 8-11.
- RITCHIE, M. E. 2009. *Scale, heterogeneity, and the structure and diversity of ecological communities*, Princeton University Press.
- SCARGLE, J. D. 1982. Studies in astronomical time series analysis. II-Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *The Astrophysical Journal*, 263, 835-853.
- SCHAPIRA, M., VINCENT, D., GENTILHOMME, V. & SEURONT, L. 2008. Temporal patterns of phytoplankton assemblages, size spectra and diversity during the wane of a Phaeocystis globosa spring bloom in hydrologically contrasted coastal waters. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, 88, 649-662.
- SCHLESINGER, W. H. 2009. On the fate of anthropogenic nitrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 203-208.
- SCHMITT, F. & NICOLIS, C. 2002. Scaling of return times for a high-resolution rainfall time series. *Fractals*, 10, 285-290.
- SCHMITT, F. G., DE ROSA, M., DURRIEU, G., SOW, M., CIRET, P., TRAN, D. & MASSABUAU, J.-C. 2011. Statistical study of bivalve high frequency microclosing behavior: scaling properties and shot noise analysis. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 21, 3565-3576.
- SCHMITT, F. G., DUR, G., SOUSSI, S. & BRIZARD ZONGO, S. 2008. Statistical properties of turbidity, oxygen and pH fluctuations in the Seine river estuary (France). *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 387, 6613-6623.

- SCHMITT, F. G., HUANG, Y., LU, Z., LIU, Y. & FERNANDEZ, N. 2009. Analysis of velocity fluctuations and their intermittency properties in the surf zone using empirical mode decomposition. *Journal of Marine Systems*, 77, 473-481.
- SCHULZ, M. & STATTEGGER, K. 1997. SPECTRUM: spectral analysis of unevenly spaced paleoclimatic time series. *Computers & Geosciences*, 23, 929-945.
- SEGURA, A., CALLIARI, D., FORT, H. & LAN, B. L. 2013. Fat tails in marine microbial population fluctuations. *Oikos*, 122, 1739-1745.
- SEURONT, L., GENTILHOMME, V. & LAGADEUC, Y. 2002. Small-scale nutrient patches in tidally mixed coastal waters. *Marine Ecology Progress Series*, 232, 29-44.
- SEURONT, L., SCHMITT, F., LAGADEUC, Y., SCHERTZER, D. & LOVEJOY, S. 1999. Universal multifractal analysis as a tool to characterize multiscale intermittent patterns: example of phytoplankton distribution in turbulent coastal waters. *Journal of Plankton Research*, 21, 877-922.
- SEURONT, L., SCHMITT, F., LAGADEUC, Y., SCHERTZER, D., LOVEJOY, S. & FRONTIER, S. 1996a. Multifractal analysis of phytoplankton biomass and temperature in the ocean. *Geophysical Research Letters*, 23, 3591-3594.
- SEURONT, L., SCHMITT, F., SCHERTZER, D., LAGADEUC, Y. & LOVEJOY, S. 1996b. Multifractal intermittency of Eulerian and Lagrangian turbulence of ocean temperature and plankton fields. *Nonlinear processes in Geophysics*, 3, 236-246.
- SEURONT, L. & VINCENT, D. 2008. Increased seawater viscosity, *Phaeocystis globosa* spring bloom and *Temora longicornis* feeding and swimming behaviours. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 363, 131-145.
- SIMPSON, J. H., BROWN, J., MATTHEWS, J. & ALLEN, G. 1990. Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification. *Estuaries*, 13, 125-132.
- SMITH, S. V., SWANEY, D. P., TALAUE-MCMANUS, L., BARTLEY, J. D., SANDHEI, P. T., MCLAUGHLIN, C. J., DUPRA, V. C., CROSSLAND, C. J., BUDDEMEIER, R. W. & MAXWELL, B. A. 2003. Humans, hydrology, and the distribution of inorganic nutrient loading to the ocean. *BioScience*, 53, 235-245.

- SMITH, V. H. 2003. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem. *Environmental Science and Pollution Research*, 10, 126-139.
- SOURNIA, A. & BIRRIEN, J.-L. 1995. La série océanographique côtière de Roscoff (Manche occidentale) de 1985 à 1992. *Cahiers de Biologie Marine*, 36, 1-8.
- SPILMONT, N., DENIS, L., ARTIGAS, L. F., CALOIN, F., COURCOT, L., CRÉACH, A., DESROY, N., GEVAERT, F., HACQUEBART, P. & HUBAS, C. 2009a. Impact of the *Phaeocystis globosa* spring bloom on the intertidal benthic compartment in the eastern English Channel: A synthesis. *Marine pollution bulletin*, 58, 55-63.
- SPILMONT, N., MÉZIANE, T., SEURONT, L. & WELSH, D. T. 2009b. Identification of the food sources of sympatric ghost shrimp (*Trypaea australiensis*) and soldier crab (*Mictyris longicarpus*) populations using a lipid biomarker, dual stable isotope approach. *Austral Ecology*, 34, 878-888.
- STEELE, J. H. & GIFFORD, D. J. 2010. Reconciling end-to-end and population concepts for marine ecosystems. *Journal of Marine Systems*, 83, 99-103.
- TENNEKES, H. & LUMLEY, J. L. 1972. *A first course in turbulence*, MIT press.
- THINGSTAD, T. F., ZWEIFEL, L. & RASSOULZADEGAN, F. 1998. P limitation of heterotrophic bacteria and phytoplankton in the northwest Mediterranean. *Limnology and Oceanography*, 43, 88-94.
- TRÉGUER, P., GOBERVILLE, E., BARRIER, N., L'HELGUEN, S., MORIN, P., BOZEC, Y., RIMMELIN-MAURY, P., CZAMANSKI, M., GROSSTEFFAN, E., CARIOU, T., RÉPÉCAUD, M. & QUÉMÉNER, L. 2014. Large and local-scale influences on physical and chemical characteristics of coastal waters of Western Europe during winter. *Journal of Marine Systems*, 139, 79-90.
- TSINOBER, A. 2001. *An informal introduction to turbulence*, Springer.
- TSIRTSIS, G., SPATHARIS, S. & KARYDIS, M. 2008. Application of the lognormal equation to assess phytoplankton community structural changes induced by marine eutrophication. *Hydrobiologia*, 605, 89-98.
- TURCHIN, P. 2003. *Complex population dynamics: a theoretical/empirical synthesis*, Princeton University Press.

- WANG, Z., QI, Y., CHEN, J., XU, N. & YANG, Y. 2006. Phytoplankton abundance, community structure and nutrients in cultural areas of Daya Bay, South China Sea. *Journal of Marine Systems*, 62, 85-94.
- WIDDICOMBE, C., ELOIRE, D., HARBOUR, D., HARRIS, R. & SOMERFIELD, P. 2010. Long-term phytoplankton community dynamics in the Western English Channel. *Journal of Plankton Research*, fbp127.
- WILLIAMSON, M. & GASTON, K. 2005. The lognormal distribution is not an appropriate null hypothesis for the species–abundance distribution. *Journal of Animal Ecology*, 74, 409-422.
- WINDER, M. & CLOERN, J. E. 2010. The annual cycles of phytoplankton biomass. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365, 3215-3226.
- WOERTHER, P. 1998. Marel: Mesures automatisées en réseau pour l'environnement littoral. *L'Eau, l'industrie, les nuisances*, 67-72.
- YU, D., CHENG, J. & YANG, Y. 2005. Application of EMD method and Hilbert spectrum to the fault diagnosis of roller bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19, 259-270.
- ZONGO, S. & SCHMITT, F. 2011a. Observations biogéochimiques des eaux côtières à boulogne-sur-mer à haute fréquence: les mesures automatiques de la bouée marel. In: F.G. Schmitt (Eds), *Observation des écosystèmes marin et terrestre de la côte d'opale: du naturalisme à l'écologie*, Presses de l'UOF, 253-266.
- ZONGO, S. & SCHMITT, F. 2011b. Scaling properties of pH fluctuations in coastal waters of the English Channel: pH as a turbulent active scalar. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 18, 82

Résumé

L'objectif principal de cette thèse est la caractérisation des dynamiques hautes fréquences en milieu côtier et en particulier de leurs extrêmes, par l'intermédiaire de l'étude de séries temporelles biogéochimiques à long terme enregistrées par des systèmes automatisés.

Les bases de données hautes fréquence utilisées dans cette étude proviennent majoritairement du programme MAREL, qui a été mis en œuvre par l'Ifremer. Des séries temporelles basses fréquences provenant des programmes de surveillance du littoral SOMLIT (CNRS, INSU) et SRN (Ifremer) sont mises à contribution pour appuyer l'importance des systèmes automatisés. La méthode EMD (Empirical Mode decomposition) nous a servi de base dans de nombreuses analyses pour étudier ces séries temporelles. Nous avons aussi utilisé des méthodes plus classiques empruntées aux domaines de l'analyse numérique et de la turbulence. Cette étude se décompose en 3 parties, et plusieurs annexes. Les matériels et méthodes sont présentés dans la première partie. Dans la seconde partie, la méthode EMD nous a permis de mettre en avant les fortes fluctuations contenues dans les blooms, ainsi que de mener des analyses spectrales grâce à un couplage avec la transformée de Hilbert. L'analyse en composante principale (ACP) a mis en avant les principaux forçages exercés sur la production primaire et les profils de températures SOMLIT laissent supposer un impact de la stratification sur l'intensité des blooms. Dans la troisième partie, nous avons mené une étude comparative entre les données basses fréquences et hautes fréquences. Et deux méthodes de cross-corrélation (TDIC et co-spectre) nous ont permis de définir une échelle caractéristique de transition entre les températures de la Manche occidentale et orientale. En annexe nous avons testé la robustesse de différentes méthodes d'analyses spectrales quant au manque de données dans les séries temporelles, qui est un problème inhérent aux bases de données enregistrées par des systèmes automatisés, et nous avons reproduit un article qui est en cours de soumission.

Mot clés : Séries temporelles hautes fréquences à long terme, systèmes automatisés en point fixe, fluctuation, multi-échelles, turbulence, méthode EMD, méthode TDIC, bloom phytoplanctonique, échelle de transition, Manche, écosystème côtier, biogéochimie, stratification.

Abstract

The main objective of this thesis is the characterization of high frequency dynamics in coastal areas and in particular their extremes, through the study of long-term biogeochemical time series registered by automated systems.

The majority of high-frequency data sets used in this study came from MAREL program. The low-frequency time series from coastal monitoring programs SOMLIT (CNRS, INSU) and SRN (Ifremer) are employed to support the importance of automated systems. The EMD (Empirical Mode decomposition) method has provided a basis for us to study several of these time series. We also have used some methods more classical borrowed from numerical analysis field and turbulence. This study is organized in three chapters, and several appendices. The first chapter is devoted to the material and method. In the second chapter, using the EMD method we have highlighted the strong fluctuations contained in the blooms, and we have performed spectral analyzes. The principal component analysis (PCA) highlighted the main forcing exerted on primary production and SOMLIT temperature profiles suggest an impact of stratification on the intensity of blooms. In the third chapter, we conducted a comparative study between low-frequency and high-frequency data. Two cross-correlation methods (TDIC and co-spectra) allowed us to define a characteristic transition scale between the temperatures of the western and eastern English Channel. In appendices we tested the robustness of different spectral analysis methods about the missing data in the time series, which is an underlying problem in the database registered by automated systems, and we reproduce a paper, which is under submission.

Keywords: long-term high-frequency time series, automated systems at fixed point, fluctuation, multi-scales, turbulence, EMD method, TDIC method, phytoplanktonic bloom, transition scale, English Channel, coastal ecosystem, biogeochemistry, stratification.